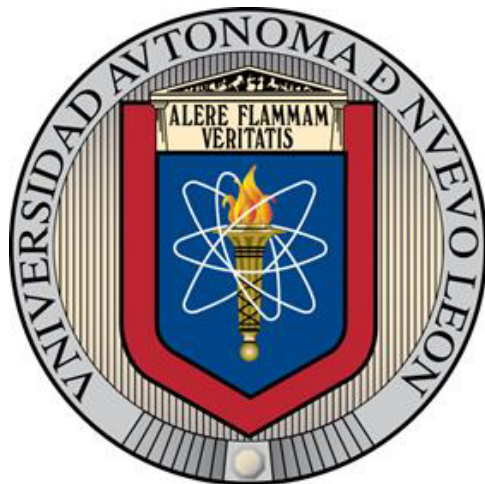


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**EFFECTO DEL CALOR DE ENTRADA EN LA MICROESTRUCTURA,
PROPIEDADES MECÁNICAS Y TRIBOLÓGICAS EN SOLDADURAS POR LA
TÉCNICA HIGH VELOCITY OXI-FUEL EN ACEROS HERRAMIENTA GRADO
D2 PARA TRABAJO EN FRÍO**

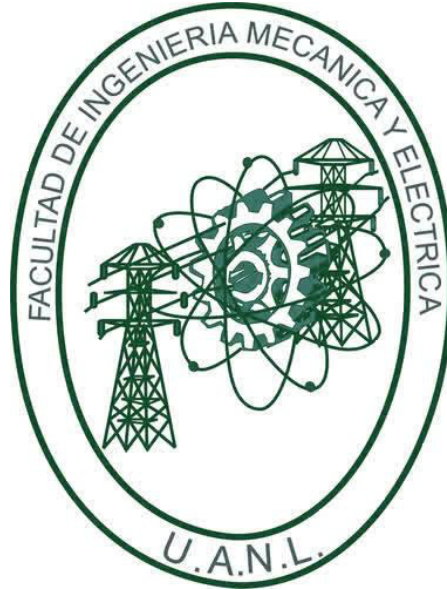
POR

CARLOS ALBERTO GUEVARA CHÁVEZ

**PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR
EN INGENIERÍA DE MATERIALES**

JUNIO, 2017

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**EFFECTO DEL CALOR DE ENTRADA EN LA MICROESTRUCTURA,
PROPIEDADES MECÁNICAS Y TRIBOLÓGICAS EN SOLDADURAS POR LA
TÉCNICA HIGH VELOCITY OXI-FUEL EN ACEROS HERRAMIENTA GRADO
D2 PARA TRABAJADO EN FRÍO**

POR

CARLOS ALBERTO GUEVARA CHÁVEZ

**PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA
DE MATERIALES**

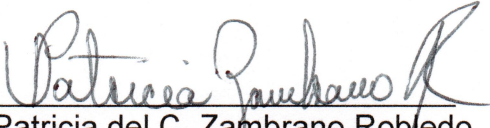
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO

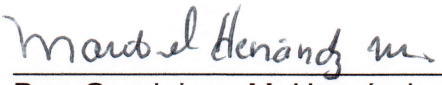
JUNIO, 2017

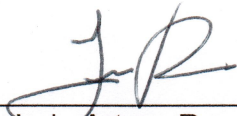
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

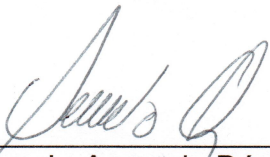
Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis "Efecto del calor de entrada en la microestructura, propiedades mecánicas y tribológicas en soldaduras por la técnica High Velocity Oxi-Fuel en aceros herramienta grado D2 para trabajado en frío" realizada por el alumno "Carlos Alberto Guevara Chávez", con número de matrícula 1577002, sea aceptada para su defensa como opción al grado de "Doctorado en Ingeniería de Materiales"


El Comité de Tesis


Dra. Patricia del C. Zambrano Robledo
Asesor

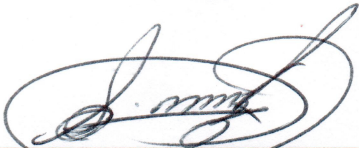

Dra. Guadalupe M. Hernández Muñoz
Coasesor


Dr. Luis Arturo Reyes Osorio
Coasesor


Dr. Jorge L. Acevedo Dávila
Coasesor


Dr. Arturo Juárez Hernández
Coasesor

Vo. Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, junio 2017

PRÓLOGO

En la presente tesis, consistió en generar la base de conocimiento para la aplicación de recubrimientos antidesgaste por soldadura de proyección térmica aplicados a herramientas de conformado AISI/SAE D2. El caso de desarrollo que se ocupa en esta investigación es la recuperación y modificación de propiedades tribológicas de aceros grado herramienta que se usan para conformar aceros con altas propiedades mecánicas que se encuentran, tanto agrietadas, desgastadas o dañadas en las zonas de trabajo. Estas piezas por lo general son relativamente muy costosas (debido a la metalurgia del proceso de fabricación). Esto se debe, en primer lugar, a la complejidad de la tecnología de fabricación, dadas las altas exigencias que requieren, que incluye procesos tales como el electro-erosivo, water jet, tratamientos térmicos criogénicos y al vacío, el uso de herramientas con control numérico, pos-tratamientos térmicos, entre otros. Además del costo elevado del material (elementos de aleación Cr, Mo, V, W, Nb, Ti principalmente), con relación a los aceros de más baja aleación. Sobre la base del estado del arte, se ha encontrado que el principal problema es el desgaste prematuro que sufren debido a las condiciones severas de trabajo, es decir la no uniformidad de las cargas, las figuras caprichosas en temas de diseño de herramientas, cambios de radio que se convierten en concentradores de esfuerzo naturales, la precipitación de fases fuera de equilibrio al momento de reparar con procesos de soldadura de Arco (GTAW, GMAW y SMAW) como lo es una Martensita metaestable sin revenir la cual se da porque la química de estos materiales usado para la generación de herramientas de conformado contiene elementos de aleación como el Cr, Mo, V, W, son grandes formadores de carburos primarios lo que es muy lógico usar esta química ya que lo que se busca es un material suficientemente duro para poder conformar a otros materiales sin que este se deforme, sin embargo a la hora de efectuar alguna reparación de estos componentes que están expuestos a cargas cíclicas de esfuerzos y condiciones severas de desgaste mecanismos combinados de impacto-abrasión- fricción-cizalla y a la no uniformidad de las cargas de trabajo

surge los defectos en zonas susceptibles al agrietamiento como lo son los cambios de radios que son concentradores naturales de esfuerzos y a las figuras caprichosas de las piezas de conformado de alto valor, la suma de estos esfuerzos ocasiona el desgaste prematuro de los herramentales y el agrietamiento de los mismos que después se convierte en una falla, el proceso actualmente utilizado para recubrir estos herramentales es el proceso GTAW y SMAW los cuales utilizan materiales de aporte similares a los del herramental base, sin embargo a la hora de efectuar los precalentamientos y postcalentamientos que son habituales por el contenido de carbono equivalente (CE) no se logra que ocurra una transformación del 100% de Martensita la cual es una estructura dura y frágil, ya que esta transformación en procesos convencionales se da alrededor de los 50°C por debajo del cero, por lo que da como resultado la fase metaestable de austenita retenida, la cual a temperatura ambiente representa una fase fuera de equilibrio que tiende a transformarse con pequeños cambios de energía (temperatura o trabajo al momento de operación de herramental) a Martensita ortorrómbica

o tetraédrica, lo cual es una microestructura muy susceptible al agrietamiento. Como bien se sabe la fase austenita tiene una estructura cúbica centrada en las caras (FCC) y por la naturaleza del proceso transforma a una Martensita metaestable sin reversionar de una estructura Tetragonal compacta u ortorrómbica dependiendo de la severidad del proceso, lo cual genera una expansión del volumen de la celda unitaria en estado sólido aproximadamente en un 3.8%, lo cual genera una gran cantidad de esfuerzos residuales en el material, lo que ocasiona que el material se endurezca y se agriete de manera prematura, no satisfaciendo la vida útil de este herramental, existen varias maneras de evitar esta transformación sin embargo no son prácticas habituales en las industrias de conformado de piezas metálicas, una es la aplicación de un tratamiento térmico integral a todo el herramental en condiciones de vacío para poder controlar la transformación de fases presentes; lo que es poco factible debido a que son tratamientos térmicos al vacío lo cual es muy costoso volver a tratar todo el herramental y sumado a esto los tiempos que este herramental está fuera de

operación y la poca disponibilidad de esta tecnología, otra alternativa es la aplicación de un tratamiento de triple revenido lo cual ha demostrado disminuir hasta casi un 6% de austenita retenida, esta sería una buena práctica sin embargo los tiempos son demasiados largos afectando a los procesos continuos, otra alternativa es aplicación de tratamientos térmicos criogénicos a temperaturas inferiores a los 196°C por debajo del cero para lograr la transformación del 100% de Martensita, sin embargo esta técnica es a nivel laboratorio y no es muy factible su implementación en la industria además de que su infraestructura es muy costosa. La alternativa de investigación propuesta es la aplicación de recubrimientos superficiales por medio de proyección térmica, ya que esta técnica permite depositar varias capas de diversos materiales con químicas que favorecen la formación de carburos en la superficie (Fe-Cr-Mo) con propiedades tribológicas de resistencia al desgaste mayores a las originales del herramental, esta técnica permite fundir estas partículas al momento de la proyección sin embargo debido al fuerte gradiente de temperatura estas se adicionan en estado semi-plasmoso es decir en un rango de distancia entre 200 a 300 milímetros desde la boquilla al material que se va reparar y una correcta relación de combustible-oxígeno alcanza temperaturas por debajo de la temperatura de Curie (727°C), lo cual es fundamental ya que no alcanza la temperatura de transformación Austenítica por lo que esta no trasforma en otra fase metaestable obteniendo las propiedades originales en el volumen en estado sólido del herramental y superiores por la aplicación de una diversa química capaz de formar carburos más estables en la matriz de la superficie promoviendo propiedades de superficie con una mayor resistencia al desgaste.

Con lo que la presente investigación se obtiene la base de conocimiento útil para regresar a servicio componentes que han sido desgastados y restaurados por técnicas de metalizado a través del control del calor de entrada en aceros de conformado en frío.

RESUMEN CURRICULAR

EDUCACIÓN

Grado Académico:	Doctorado (Créditos terminados)
Lugar:	FIME, Universidad Autónoma de NL/AIMEN (España)
Programa:	Doctorado en Ingeniería de Materiales
Nombre de Tesis:	Efecto del calor de entrada en la microestructura, propiedades mecánicas y tribológicas en soldaduras por la técnica High Velocity Oxi-Fuel en aceros herramienta grado D2 para trabajado en frío.
Grado Académico:	Maestría
Lugar:	Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V. / University of Toronto
Programa:	Maestría en Tecnología de la Soldadura Industrial
Nombre de Tesis	Recuperación de dados para estampado de acero grado D2 mediante procesos de soldadura no convencionales
Grado Académico:	Especialidad
Lugar:	Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V.
Programa:	Especialidad en Tecnología de la Soldadura Industrial
Nombre de Tesis	Recuperación de dados para estampados de acero grado D2, mediante procesos de soldadura utilizados en la industria automotriz
Grado Académico:	Ingeniería
Lugar:	Instituto Tecnológico de Saltillo
Programa:	Ingeniería Metalúrgica
Nombre de Tesis u Otro:	Análisis de falla en tubería de perforación TP 5" Gr. S-135 25.6 lb/pie, NC-50" (Plataforma: MAY-7 ALFA)

EXPERIENCIA PROFESIONAL

Nombre de la Empresa:	GRUPO SOLDATECH
Puesto:	Proyectos Especiales
Lugar:	Ramos Arizpe, Coahuila
Fecha ingreso:	Febrero 2016
Fecha egreso:	A la fecha
Nombre de la Empresa:	Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V.
Puesto:	Coordinador de proyectos de desarrollo tecnológico, investigación e innovación.
Lugar:	Saltillo, Coahuila
Fecha ingreso:	Diciembre 2006
Fecha egreso:	Enero 2016

ALGUN DATO IMPORTANTE: poner la revista volumen páginas, o el DOI en todos

Habilidades especiales	Signatario autorizado en 10 pruebas de laboratorio (preparación de muestras, severidad de inclusiones no metálicas, tamaño de grano, microataques de metales y aleaciones, macroataques de metal, ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) como	
	Nivel II en ensayos no destructivos (inspección Visual), acreditación en ensayo no destructivo de réplica metalográfica	
	Inspector de soldadura, avalado por la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V.	
	Manejo de equipos de laboratorio, corte, montaje desbaste, pulido, microscopio óptico, microscopio electrónico de barrido, EDS, Equotip, Micro durómetro, Maquina de tensión Universal, Durómetro en escalas HRC, HRB, Vickers, HB, prueba de Impacto Charpy, manejo de equipos robotizados de soldadura, manejo de normas AWS, ISO, DIN, ASTM	
Publicaciones	Publicación en revista indexada con el artículo "Comportamiento Tribológico y Microestructural en Recubrimientos Aplicados por GTAW y HVOF (Proceso Térmico de Esparado) y Usado en Recuperación de Aceros Grado Herramienta AISI/SAE D2, poner la revista volumen páginas, o el DOI	2016
	Publicación en revista indexada con el artículo "Thermo-Mechanic and microestructural analysis of an underwater welding joint poner la revista volumen paginas, o el DOI	2016
	Publicación en congreso internacional con el artículo "study on the effect of polarity on the arc blow, microstructure and mechanical properties in tooling repair cracks by TIG tandem welding process"	2016
	Publicación en congreso internacional con el artículo "Tribological and microstructural behavior of coatings applied by HW-GTAW process and used in recovering of drill pipe API TP 5" Gr. S-135"	2016
	Publicación en congreso internacional con el artículo "Desarrollo de un sistema tecnológico de reciclaje de acumuladores para la obtención de plomo de alta pureza libre de azufre a partir de pastas residuales"	2016
	Publicación en congreso internacional con el artículo "estudio de los efectos de los parámetros para obtener polietileno de baja densidad usado como inhibidor de corrosión para uniones disimiles"	2015
	Publicación en congreso internacional con el artículo "estudio de los efectos en las propiedades mecánicas y microestructurales del proceso semisolidmetal usado en la inyección de componentes de aluminio para la industria aeroespacial"	2015
	Publicación en congreso internacional con el artículo "Comparison of microestructural and mechanical properties behavior of recovering cold work tool steel molds by GTAW and HVOF welding process	2015

Publicación en congreso internacional con el artículo "Study the effect of the variables in the electrostatic deposition technique, applied collector powder coating used in electronic components"	2015
Publicación en congreso internacional con el artículo "comparison of microstructural and mechanical properties behavior of recovering cold work tool steel molds by HWGTAW and HVOF welding process"	2014
Publicación en congreso internacional con el artículo "study of effect of process parameters PTA welding, on the properties of coatings applications used in corrosion resistance and wear on metal substrates"	2014
Publicación en congreso internacional con el artículo "Study of the effect of process variables tungsten hot wire gas arc welding (GTAW-HW) on the microstructure and mechanical properties of tool steels for stamping dies recovered"	2014
Publicación en congreso internacional con el artículo "Caracterización de Reparación por Soldadura Fuerte en Generadores Eléctricos (Antorcha e Inducción)"	2014
Publicación en congreso internacional con el artículo "Failure Analysis of Drill Pipe Grade S-135"	2014
Publicación en congreso internacional con el artículo "estudio del efecto de los parámetros de soldadura en uniones disímiles de acero inoxidable y acero bajo carbono soldados por el proceso de TIG-spot pulsado",	2013
Obtención de registro de propiedad intelectual como modelo industrial, número de registro 38484	2013
Registro público del derecho de autor "Manual de conformado y estampado 1"	2013
Publicación en congreso internacional con el artículo "Análisis mediante el método de elementos finitos del comportamiento térmico, mecánico y microestructural en la unión de soldadura multi-pasos GMAW de placas de acero Hardox 400 y ASTM 514."	2012
Publicación en congreso internacional con el artículo "Efecto de la Velocidad de Avance y Mezcla de Gases de Protección en la Penetración y Propiedades Mecánicas Durante la Fabricación de Tubería de Acero Inoxidable 304L por el Proceso GTAW"	2012
Publicación en congreso internacional con el artículo "Modelación Matemática de Temperatura para la Deposición de Partículas de Fe-Cr-Mo sobre Acero D2 por HVOF2	2012
Obtención de registro de propiedad intelectual como modelo industrial, número de registro 98092	2012
publicación en congreso internacional con el artículo "Handling chemical, thermal and microstructure of the casting process of gray iron alloy for increased wear resistance in the manufacture of die for glass containers"	2012
Publicación en congreso internacional con el artículo "Mathematical Modeling of Temperature for the Deposition of Particles of Fe-Cr-Mo on Tool Steel D2 by HVOF"	2012
Publicación en congreso internacional con el artículo "Finite Element Method Analysis of Thermal, Mechanical and Microstructural Behavior of GMAW Multipass Weld Joint of Hardox 400 and ASTM 514 Steel Plates"	2012
Publicación en congreso internacional con el artículo "Effect of Travel Speed and Mixed Gas Penetration Protection on Mechanical Properties During the Manufacture of 304L Stainless Steel Tubing by the GTAW Process"	2012
Publicación en congreso internacional con el artículo ""Study the effect of the variables in the electrostatic deposition technique, applied collector powder coatings used in electronic components"	2012

	Publicación en congreso internacional con el artículo "Efecto de la microestructura y propiedades mecánicas en uniones disimiles de inconel 713C y acero 4140 soldadas por electron beam welding (EBW)"	2011
	Publicación en congreso internacional con el artículo "EFFECTS OF HVOF PROCESS PARAMETERS ON THE PROPERTIES OF THE Fe-Cr-Mo COATINGS AND THEIR EFFECT ON CORROSION PROPERTIES"	2010
	Publicación en congreso internacional con el artículo "Comparison of microstructural and mechanical properties behavior of recovering cold work tool steel molds by GTAW and HVOF welding process"	2010
	Publicación en congreso internacional con el artículo "Parameter Effects of HVOF Process in Fe-Cr-Mo Covering Properties"	2010
	Publicación en congreso internacional con el artículo "ESTUDIO PREELIMINAR DE LOS EFECTOS DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO HVOF EN LAS PROPIEDADES DE LOS RECUBRIMIENTOS ANTIDESGASTE"	2009

DEDICATORIA

Esta tesis de doctorado, si bien ha requerido de esfuerzo y dedicación, no hubiese sido posible su finalización sin la cooperación desinteresada de todas y cada una de las personas que colaboraron en mi desarrollo profesional y personal.

Primero y, antes que nada, doy gracias a Dios, por fortalecerme y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido soporte y compañía durante todo el periodo de estudio. A mi familia, por el apoyo que he tenido incondicionalmente en mi vida.

Gracias a cada uno de los maestros y doctores, que participaron en mi desarrollo profesional durante mi carrera, sin su ayuda, conocimientos y consejos no estaría en donde me encuentro ahora. A todos mis compañeros y amigos quienes me han compartido experiencias y he aprendido mucho de ellos.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) que gracias al apoyo brindado se pudo realizar la investigación de esta presente Tesis.

Por último, quiero agradecer a todas aquellas personas que dejaron huella y contribuyen al éxito de este trabajo.

ANTECEDENTES

El proceso tecnológico de conformación de metales tiene una característica esencial la cual consiste en el alto costo de las herramientas que intervienen en el mismo. Estas generalmente están sometidas a severas condiciones de trabajo, tales como el desgaste en sus zonas de trabajo, cargas de impacto, trabajo en caliente, los esfuerzos a tensión ó compresión de su estructura debido a las configuraciones complejas de estas herramientas y, por tanto, la no uniformidad en la distribución de las cargas a que se someten, entre otros aspectos. El uso de la soldadura de reparación es una opción principal, ya que este proceso posibilita devolver a la pieza, con suficiente eficiencia y bajo costo, sus características dimensionales, propiedades mecánicas y tribológicas superiores. Las aleaciones Fe-Cr-Mo son usadas en recubrimientos para la protección de los componentes sometidos al desgaste y corrosión [i.e., R. Ebner, et al. (2007)]. Los recubrimientos de rociado térmico a alta velocidad (HVOF) en aleaciones Fe-Cr-Mo han sido reportados con buenos resultados en el campo de las proyecciones para los aceros grado herramienta para trabajado en frío.

El HVOF es un método atractivo para aplicar soldadura de revestimiento y recuperar diámetros. [J.C Tan, L. looney (2001)]. Nuevas superficies pueden ser provistas sin el material de distorsión causado por soldadura [Doyen, P.S.; Skrabec, Q. R. (1997)]. Para aquéllos materiales que son sensibles al agrietamiento y cambios en la composición debidos a la formación de fases frágiles, la formación de carburos primarios y secundarios $M_{23}C_6$ y M_7C_6 . Debido a las condiciones del proceso, las cuales combinan una relativamente baja temperatura de flama con un bajo tiempo de exposición [Losano, G., J Morgenfeld, (2001),]. Este método emplea una alta presión de un combustible (propileno, acetileno, propano o gases de hidrógeno) para producir temperaturas del gas superior a los 3029 °K y para generar una velocidad supersónica o hipersónica del gas, de aproximadamente 2000 m/s, más de cinco veces la velocidad del sonido [M.B. Beardsley, (1997)]. El acero grado herramienta para trabajado en frío es un material susceptible al agrietamiento y formar estructuras

fuera de equilibrio lo cual es un factor crítico en este tipo de componentes. La microestructura y las propiedades físicas de los recubrimientos aplicados por soldadura están determinadas por las propiedades físicas y químicas de las partículas impregnadas en los sustratos y los materiales de aporte usados. [i.e., J. Saaedi, et al. (2009)]. El presente estudio considera la aplicación del HVOF a componentes desgastados y es comparado con la aplicación de soldadura por proceso convencional GTAW y observar propiedades microestructurales, dureza y resistencia al desgaste, así como la calidad de la reparación entre los dos métodos propuestos. Por lo tanto, el desempeño de la unión soldadas por técnicas no convencionales como lo es el caso del HVOF cambia y las propiedades mecánicas, tribológicas y metalúrgicas son modificadas debido a la variación de la transformación de austenita a martensita lo cual genera una expansión de volumen cercana al 3.8%, a lo cual se atribuye una gran cantidad de esfuerzos generados propiciando el agrietamiento de las piezas soldadas por técnicas convencionales.

La presente investigación, estudia la variación en propiedades mecánicas, tribológicas y microestructurales de uniones soldadas por proyección térmica a diferentes condiciones en aceros grado herramienta D2 para trabajado en frío, actualmente utilizados en la industria automotriz en el área de conformado de metales y mediante esta información analizar los cambios microestructurales, en propiedades mecánicas y tribológicas que permitan comprender y explicar los mecanismos metalúrgicos que producen estos cambios y con esta información poder establecer los parámetros de soldadura óptimos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Sobre la base de estado del arte consultado, la aplicación de un material reparador mediante técnicas no convencionales de soldadura (HVOF) deberá proveer propiedades tribológicas iguales o superiores a las del material base sin causar la distorsión que los procesos convencionales ocasionan, ya que los cambios de volumen debido a que este material es muy susceptible al agrietamiento y formar estructuras fuera de equilibrio son factores críticos en este tipo de componentes, lo cual se minimiza con la aplicación de recubrimientos ya que no se alcanzan las temperaturas de transformación y precipitación de estas fases en el HVOF, esta técnica no permite esta diferencia de volumen por lo tanto la distorsión no es un problema, por lo que surge como una alternativa de reparación de herramientas.

El caso que se ocupa en esta investigación trata de la recuperación de herramientas de conformación, tanto agrietadas, desgastadas o dañadas en las zonas de trabajo. Estas piezas por lo general son relativamente costosas. Esto se debe, en primer lugar, a la complejidad de la tecnología de fabricación necesaria, dadas las altas exigencias que requieren, que incluye procesos tales como el electro-erosivo, el uso de herramientas con control numérico, tratamientos térmicos, entre otros. Además del costo elevado del material, con relación a los aceros de más baja aleación.

A esto se le suma que es un proceso de fabricación relativamente lento, además de esto, en muchas ocasiones puede afectarse el cumplimiento de un volumen de producción a causa de la rotura de una herramienta de conformación y en esos momentos es fundamental tener a mano una solución factible a aplicar para la reparación y puesta en funcionamiento de estas piezas.

Teniendo en consideración lo anteriormente planteado, es de gran importancia el aumentar conocimientos y experiencias dentro del tema de la reparación de

herramientas de conformación mediante técnicas de soldadura no convencionales (HVOF). Este trabajo es la continuación de una recopilación bibliográfica la cual da como alternativas de reparación el uso de técnicas no convencionales de soldadura en la cual se abundará más en el tema y se desarrolla un diseño de experimentos para validar los parámetros del proceso para alcanzar dicha meta.

En este trabajo se busca obtener información bibliográfica y análisis experimentales que permitan crear una base de información con vistas a enfrentar el trabajo de la recuperación de herramientas de conformación en la industria nacional y proveer conocimiento en la temática de reparación por soldadura mediante procesos no convencionales.

Objetivo general del estudio

Consistió en determinar las variables que afectan el calor de entrada y la soldabilidad de los aceros grado herramienta D2 para trabajado en frio y establecer la interacción que existe entre estas variables en el desempeño de la unión soldada, así como la variación de sus propiedades mecánicas, tribológicas y microestructurales debidas a la entrada de calor producida por el proceso de soldadura utilizado.

Objetivos Específicos

Determinar las principales variables que afectan la soldabilidad de los aceros grado herramienta D2 para trabajado en frio.

- Determinar la interacción que existe entre las principales variables que afectan la soldabilidad de los aceros grado herramienta D2 para trabajado en frio.
- Determinar cómo las variables de soldadura modifican la microestructura resultante y como afecta está el desempeño de la unión soldada y sus propiedades mecánicas y tribológicas.
- Generación de conocimiento que permita comprender los mecanismos de transformación microestructural (austenita-martensita) y afectación en las propiedades mecánicas y tribológicas, para su utilización en la elaboración de procedimientos de soldadura confiables.
- Estudiar el efecto de los esfuerzos residuales durante la transformación de austenita a martensita durante el proceso de soldadura.
- Establecer los parámetros adecuados del proceso de soldadura HVOF para asegurar una buena deposición del revestimiento en el sustrato y validarlo mediante pruebas mecánicas y tribológicas para la reparación de los dados de acero grado herramienta D2.

JUSTIFICACION

Aún hoy en día, expuesta la industria a un cambiante y cada vez más competitivo escenario económico, se encuentra con la realidad de que valiosos recursos productivos no son utilizados eficientemente, debido a la falta de conocimiento en las modificaciones microestructurales y de metalurgia de polvos aplicados por técnicas no convencionales como lo es HVOF, a fin de proveer protección contra el desgaste, corrosión e incrementar la vida útil del material.

Los aceros grado herramienta D2 para trabajado en frío, que son unidos mediante diferentes procesos de soldadura, en donde se requiere conocer las variables involucradas, así como la interacción de estas y qué efectos tiene la entrada de calor del proceso de soldadura aplicado en la microestructura, propiedades mecánicas y tribológicas obtenidas. Además de comprender y explicar los mecanismos metalúrgicos que producen estos cambios, los esfuerzos residuales y con esta información poder establecer los parámetros de soldadura óptimos que puedan ser utilizados para evitar el cambio de austenita a martensita lo cual genera una expansión de volumen cercana al 3,8%, creando una gran cantidad de esfuerzos residuales los cuales con el paso del tiempo y a la naturaleza propia del proceso tienden agrietar los componentes de conformado en frío.

En el caso específico del acero grado herramienta D2, gracias a su alto contenido de Carbono y Cromo principalmente su soldabilidad se complica, ya que para llegar al inicio de la transformación martensítica se requiere de un enfriamiento a temperaturas criogénicas en virtud de que el inicio de la misma se encuentra por debajo de los 50°C, otra manera de minimizar esta transformación sería con tratamiento térmico de triple revenido. Sin embargo, no se logra la transformación completa generando así esfuerzos en el material haciendo susceptible a fallar por agrietamiento en frío.

Hoy en día nadie cuestiona el hecho de que dadas las restrictivas condiciones económicas en las cuales debe desenvolverse toda actividad, es imprescindible

minimizar costos de operación y maximizar el rendimiento de la maquinaria. Buscando siempre la optimización de recursos, esto se observa constantemente en los depósitos de material inservible o fuera de servicio, en la categoría de: fuera de servicio, irreparable, piezas gastadas, no admite reparación, en estado de exclusión, obsoleta, etc., de seguir por este rumbo se concluirá que millones de pesos son anualmente arrojados a la chatarra en el mundo entero, siendo estas últimas depositadas por largos años en bodegas como repuestos que nunca serán utilizados. Es por ello de gran importancia de generar conocimiento a fin de poder proveer protección a los componentes de conformado en frío a través de la aplicación de metalurgia de polvos. Los cuales podrán volver a ser usados, y así minimizar los costos generados por el desperdicio de piezas que se consideran fuera de servicio y prolongar su vida útil, lo anterior bajo la primicia del empleo de procesos de soldadura no convencionales, la cual presenta ventajas en relación a los procesos convencionales y surge como alternativa de reparación además de proveer propiedades superiores a las del material base.

HIPÓTESIS

Sobre la base de estado del arte consultado, la aplicación de un material reparador mediante técnicas no convencionales de soldadura, como lo es la proyección térmica de alta velocidad (HVOF), deberá proveer propiedades tribológicas iguales o superiores a las del material base, sin causar la distorsión que los procesos convencionales ocasionan.

LÍMITES DEL ESTUDIO

La presente investigación tiene el alcance de determinar los parámetros requeridos para la reparación de dados para estampado de acero grado D2 por la técnica de proyección térmica de alta velocidad (HVOF).

TABLA DE CONTENIDO

SÍNTESIS	19
CAPÍTULO 2	22
ESTADO DEL ARTE	22
2. ACEROS DE GRADO HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN FRÍO	22
2.1. ACEROS DE GRADO HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN CALIENTE	23
2.2. ACEROS PARA MOLDES DE PLÁSTICO	23
2.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEROS PARA HERRAMIENTA	24
2.4. MECANISMOS DE DESGASTE PRESENTES DURANTE LA OPERACIÓN DE CONFORMADO DE METALES	28
2.4.1. ABRASIÓN	29
2.4.2. IMPACTO	31
2.4.3. FRICCIÓN	33
2.5. SOLDADURA APLICADA PARA LA RECUPERACIÓN DE LOS ACEROS PARA HERRAMIENTAS	35
2.6. RECOMENDACIONES GENERALES PARA LA SOLDADURA DE ACEROS PARA HERRAMIENTAS	37
2.6.1. METALES DE APORTE	40
2.7. PRECALENTAMIENTO	41
2.8. TÉCNICAS FUNDAMENTALES PARA LA REPARACIÓN DE HERRAMIENTAS POR MEDIO DE SOLDADURA	44
2.9. TÉCNICA DE ARRASTRE (TUG OFF)	47
2.10. PROCESO DE PROYECCIÓN TÉRMICA COMO ALTERNATIVA DE REPARACIÓN DE HERRAMIENTAS DE CONFORMADO	49
2.10.1. INTRODUCCIÓN A LA PROYECCIÓN TÉRMICA (THERMAL SPRAYING)	49
2.11. APLICACIONES	57
2.11.1. ALTA VELOCIDAD (HVOF)	58
2.12. PROPIEDADES DE LOS RECUBRIMIENTOS APLICADOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA DE ALTA VELOCIDAD	63
2.13. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS APLICADOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA	65
2.14. PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS DE RECUBRIMIENTOS APLICADOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA (HVOF)	74
CAPÍTULO 3	76
METODOLOGÍA	76

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA UTILIZADA.....	76
3.1.3 PRUEBAS MECÁNICAS.....	84
3.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	85
3.3 MÉTODOS ESTADÍSTICOS	85
CAPÍTULO 4	87
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	87
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL METAL BASE	87
4.1.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL METAL BASE	87
4.1.2 ANÁLISIS METALOGRÁFICO EN SOLDADURAS ASTM E-3/07, E-407/05	90
4.1.3 ENSAYO DE MICRODUREZA: ASTM E384/08.	101
4.1.6 ENSAYO DE ADHERENCIA ASTM C 297/04 Y ASTM D 4541/02 ..	115
4.2 ANÁLISIS DE VARIANZA	124
FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE LA TRAYECTORIA DE LA PARTÍCULA.....	127
NOMENCLATURA	131
DESARROLLO DE MODELO DE TRAYECTORIA DE PARTÍCULA MEDIANTE DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.....	132
Modelo 3D de Boquilla	133
CAPÍTULO 5	146
CONCLUSIONES	146
BIBLIOGRAFÍA.....	149
Listado de Figuras	153

SÍNTESIS

La presente investigación hace una recopilación informativa y un desarrollo experimental acerca de los aspectos esenciales a considerar durante la aplicación de recubrimientos por soldadura mediante procesos no convencionales High Velocity Oxi Fuel (HVOF por sus siglas en inglés) de reparación de herramientas de conformado. En este trabajo se incluye las características metalográficas, propiedades mecánicas, tribológicas de los aceros grado herramienta, características de los polvos, procedimientos y parámetros tecnológicos recomendados para la recuperación por soldadura de acero grado herramienta D2 para conformado en frío, mediante la aplicación de proyecciones térmicas de alta velocidad, así como los consumibles más utilizados para su soldadura y las técnicas fundamentales utilizadas con este fin.

Para poder determinar las características de los herramentales de conformado se realizó una etapa exploratoria, en la cual se obtuvieron las propiedades del material a reparar, mediante técnicas de caracterización como lo son: análisis químico, análisis metalográfico, ensayo de dureza, ensayo de resistencia al desgaste, encontrándose que el material cumple con las especificaciones de un acero grado AISI/SAE D2 tratado térmicamente. Con la información obtenida se procedió a realizar un procedimiento de soldadura por la técnica convencional Gas Tungsten Arc Welding, (GTAW por sus siglas en inglés), a fin de tomar como referencia las condiciones con las que actualmente se repara un herramental de estas características, una vez soldadas las muestras con cinco distintos materiales de aporte se seleccionó el aporte con mayor resistencia al desgaste. Después de haber obtenido las características de una reparación bajo la técnica convencional GTAW, se procedió a realizar un diseño de experimentos del tipo Taguchi, a fin de determinar las variables críticas del proceso de proyección térmica HVOF que afectan a la trayectoria de la partícula a depositar, encontrándose que la distancia y la relación combustible/oxígeno fueron las de mayor impacto. Posteriormente en busca de la selección de un material revestido adecuado la cual envuelve más que la elección de las propiedades deseadas del depósito, la consideración de

este debe ser dada a las condiciones, así como la función del revestimiento y el servicio del entorno, en suma a las propiedades físicas y químicas del revestimiento y del sustrato, encontrándose que la aleación Fe-Cr-Mo provee la unión físico-química entre el sustrato y el material reparador, cabe señalar que el tamaño de partícula es muy importante ya que se busca una distribución Gaussiana para obtener una mayor densidad de recubrimiento. Una vez con los parámetros de proceso que afectan a la trayectoria de la partícula se procedió a depositarlos en una matriz de herramental con falla, este componente presenta una disolución por picadura, en donde el Cloro obtenido del decapado de una lámina negra es el causante de este fenómeno de corrosión.

La técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), y microanálisis realizado sobre los productos de corrosión antes descritos, identificaron como las principales especies químicas al Hierro (Fe), Cloro (Cl) y Oxígeno (O), además del mecanismo de “Cazuela” característico de una disolución localizada, la cual fue reparada con la técnica de HVOF para poder así regresarla a servicio. Una vez ajustados las condiciones de aplicación del HVOF, se efectuaron 9 pruebas, variando los diferentes parámetros de soldadura por proyección, encontrando como respuesta las propiedades mecánicas y tribológicas superiores a las del herramental antes de la aplicación de la técnica no convencional, sin embargo no todas las muestras fueron aceptadas, a mayor relación combustible/Oxígeno y una menor distancia se encontró un incremento en la densidad del recubrimiento y una mayor espesor de capa, siendo este más resistente al desgaste. Por otra parte se encontró oxidación en la interfase del material reparador y el sustrato lo que ocasiona concentradores de esfuerzos naturales que propician un desprendimiento del depósito, por lo tanto una pobre adherencia, por lo que no es aceptada como una reparación exitosa, con distancia menores y la mínima relación combustible/Oxígeno, se encontró una densidad de recubrimiento y un espesor de capa menor, sin embargo no se encontró oxidación en la interfase del material reparador y el sustrato, siendo esta una reparación exitosa ya que en las pruebas de adherencia, resistencia al desgaste, pruebas mecánicas, Microscopía Electrónica de Barrido, cumplen

para la especificación de un acero grado herramienta AISI/SAE D2, pudiendo este herramental regresar a servicio prolongando así su vida útil además de que el recubrimiento seleccionado para su aplicación le provee una mayor resistencia a la corrosión gracias a la composición química del mismo.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

La mayoría de los procesos industriales envuelven alguna etapa de conformación o corte, en el sector metal-mecánico. En estos procesos, son empleadas herramientas para los más diversos fines, desde calibres y patrones, hasta moldes y matrices complejos y de alta resistencia mecánica. Tales herramientas son normalmente construidas de materiales, denominados aceros grado herramienta. Estos pueden ser divididos en tres clases básicas, por el ramo de aplicación (R. Ebner, etal. 1999).

2. ACEROS DE GRADO HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN FRÍO

Son aceros empleados como herramientas o matrices de procesos de corte y conformación de otros materiales en temperaturas por debajo de 200°C, típicamente a temperatura ambiente. Se destacan, en esta clase, las aplicaciones de corte y conformación de placas, peines y rollos laminadores de rosca, herramientas para acuñado y forjado en frío. Los aceros grado herramienta para trabajo en frío poseen como propiedades fundamentales la resistencia mecánica, dada por la alta dureza de esos materiales, y resistencia al desgaste. Para aplicaciones de conformación de metales, para trabajo en frío, en especial en placas de acero, la propiedad de tenacidad también es muy importante. (Steven Thompson 1999).

2.1. ACEROS DE GRADO HERRAMIENTA PARA TRABAJO EN CALIENTE

Son empleados en la conformación de materiales, especialmente de aleaciones metálicas, en altas temperaturas por encima de 500°C. En estos procesos, la temperatura a la cual la herramienta es sometida también influye significativamente en la vida útil. Por lo tanto, las propiedades de los aceros empleados son sustancialmente diferentes de los aceros para trabajo en frío, se destacan dos, las propiedades de resistencia al trabajo en caliente y tenacidad. Las principales aplicaciones se dividen en tres ramos – forjado en caliente de aceros, extrusión en caliente o fundición bajo presión de aleaciones no ferrosas (Steven Thompson 1999).

2.2. ACEROS PARA MOLDES DE PLÁSTICO

Utilizados en moldes para inyección, extrusión o soplo de polímeros termoplásticos. En esta clase, se destacan las propiedades del acero grado herramienta relacionada a la manufactura del molde, en términos de mecanizado, respuesta al tratamiento térmico, soldabilidad y, para casos de polímeros clorados, resistencia a la corrosión. Ejemplo de lo anterior se observa en la figura 2.1 (Steven Thompson 1999).

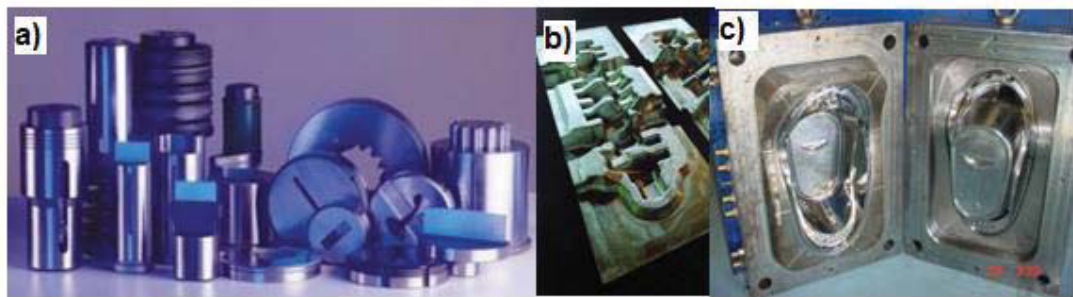


Figura 2. 1 Aspecto general de los moldes utilizados en la industria automotriz: a) molde para trabajado en frío, b) molde para trabajado en caliente, y c) molde para inyección de plástico. (Weld mold company 2000).

Figura 2. 2 Aspecto general de los moldes utilizados en la industria automotriz: a) molde para trabajado en frío, b) molde para trabajado en caliente, y c) molde para inyección de plástico. (Weld mold company 2000).

A diferencia de los aceros de aplicación estructural, los aceros herramienta tienen propiedades que son llevadas al límite en sus aplicaciones constantemente. Por mencionar una matriz de fundición bajo presión de aluminio, siempre poseerá grietas térmicas, dada la rigurosidad de la aplicación. En una herramienta de trabajo en frío, generalmente, es retirada de operación por el desgaste ocurrido en la región de trabajo. Esta alta exigencia aplicada a los aceros herramienta, incurre en la constante necesidad de mejorar propiedades por parte del acero empleado (R. Ebner, et al. 1999).

2.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEROS PARA HERRAMIENTA

Los aceros para herramientas y matrices están clasificados por el Instituto Americano del Hierro y el Acero (por sus siglas en inglés AISI) y la sociedad de ingenieros automovilísticos, (SAE) en 7 grupos principales (ASM 1993). Esta nomenclatura hace referencia al medio normal de temple o a las aplicaciones generales de estas aleaciones. (H. Berns 1992). En la tabla 2.1 se muestra la clasificación de aceros para herramientas según AISI/SAE.

Tabla 2. 1 Clasificación de aceros para herramientas según AISI/SAE (ASM 1993).

Grupo	Letra símbolo	Tipo
Endurecible al agua	W	Al Carbono
Resistente al choque	S	Medio carbono, bajo aleación
Trabajo en frío	O	Endurecible en aceite
	A	Media aleación endurecible al agua
	D	Alto Carbono, alto Cromo
Trabajo en caliente	H	Cromo (H1-H19)
		Tungsteno (H20-H39)
		Molibdeno (H40-H59)
Acero rápido	T	Tungsteno
	M	Molibdeno

Molde	P	Bajo Carbono
Propósitos especiales	L	Baja aleación

Los grupos están subdivididos en tipos, basados estos en la composición química. Los de baja aleación endurecibles en aceite contienen manganeso y pequeñas cantidades de cromo y tungsteno. Estos presentan muy buenas propiedades de no deformación y están menos propensos a la distorsión o al agrietamiento durante el tratamiento térmico, que los aceros endurecibles en agua. Debido a su alto contenido de carbono, poseen una adecuada resistencia al desgaste para aplicaciones de jornada corta, a temperaturas cercanas al ambiente. Ellos presentan buena maquinabilidad y resistencia a la descarburización, tenacidad regular.

Como puede apreciarse en la tabla 2.1, existe una variedad de aceros para herramientas, los cuales se componen de un amplio rango de composición química, que va desde aceros al carbono (de alto carbono) hasta aceros de alta aleación, cuyos elementos aleantes más frecuentes son el Cr, Mn, W, Mo y V. En el caso de aplicar soldadura la selección del proceso va a depender del tipo de aceros del cual esté fabricada la herramienta, el tipo de daño que está presente (desgaste ó grieta), el estado de tratamiento térmico en que se encuentre, las características de la zona dañada, entre otros. En la figura 2.2, se observa algunas aplicaciones de los aceros grado herramienta y los factores que influyen en la vida útil de la misma (B. Salas 1996).

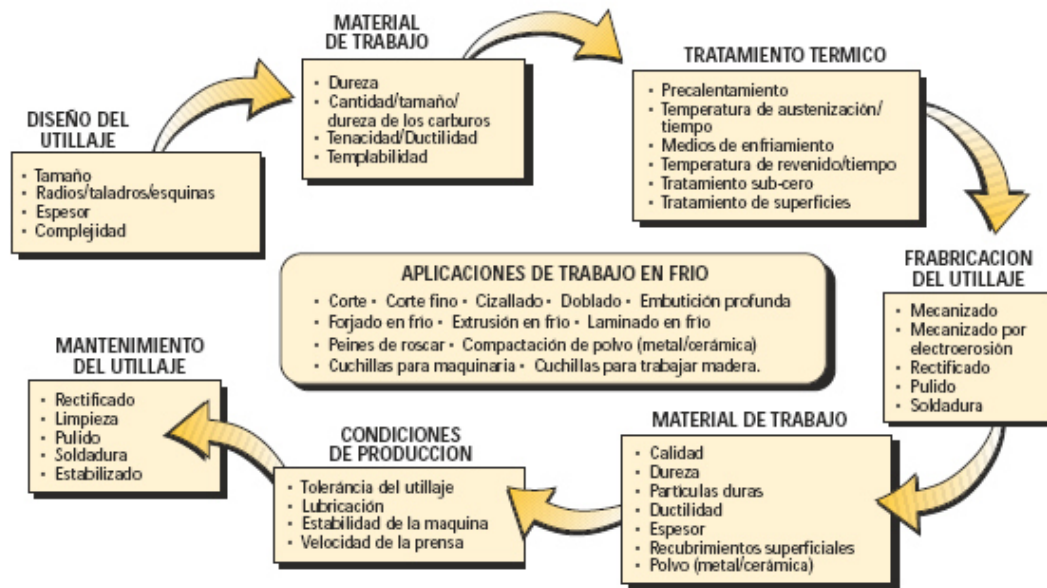


Figura 2. 3 Aplicaciones de aceros para trabajado en frío (B. Salas 1996).

Los aceros para herramientas presentan determinadas características metalúrgicas que son necesarias a tener en cuenta a la hora de establecer un procedimiento para su reparación por soldadura. (D. Cedré, etal. 2003). Debido a que ellos generalmente contienen al menos 0,6 % de carbono, para proveer dureza martensítica, esto provoca que posean una dureza mínima de 60 HRc. El carbono en exceso de la composición eutectoide va a estar presente en los aceros como carburos insolubles en la matriz martensítica. Algunos tipos de aceros para herramientas contienen menos porcentaje de carbono para proveer tenacidad y resistencia al impacto. Por ejemplo, los de la serie P que son usados para moldes de inyección de plástico. (D. Cedré, etal. 2003).

El endurecimiento de los aceros para herramientas sigue las reglas generales que gobiernan este mecanismo, para los aceros aleados en general. El acero de bajo Carbono, endurecible en agua, obviamente alcanza menor dureza. Los aceros para herramientas aleados generalmente poseen suficientes elementos de aleación para permitir el temple a bajas velocidades, en aceite o aire. Elementos de aleación tales como el Cr, el Mo y W, los cuales se encuentran comúnmente en los aceros para herramientas, aumentan la temperatura eutectoide del acero, por la estabilización de la fase ferrítica.

Adiciones de vanadio tienen un efecto similar. (D. Cedré, etal. 2003). Al mismo tiempo el contenido de carbono de la composición eutectoide disminuye con el incremento de la adición de algunas aleaciones. Esto tiene lugar debido a que tales elementos tienen mayor afinidad por el carbono que el hierro. Como resultado de esto, en los aceros para herramientas se requieren altas temperaturas para disolver los carburos en la austenita.

A mayor contenido de carbono en la austenita es más lenta su transformación a otras estructuras. La austenita de alto porcentaje de carbono puede quedar retenida a temperatura ambiente, con altas velocidades de temple. El enfriamiento subsiguiente, por debajo de la temperatura ambiente, va a transformar la austenita retenida en martensita. Al mismo tiempo el acero se expandirá y se producirán o incrementarán las tensiones residuales. En general, todos los elementos de aleación de los aceros para herramientas, excepto el cobalto disminuyen la temperatura de transformación austenita-martensita. En la figura 2.3, aparece la estructura metalográfica del acero D2, el cual es un caso típico de acero para herramienta de alta aleación. Aquí puede apreciarse que estos aceros presentan una estructura Martensítica, con carburos uniformemente distribuidos (D. Cedré, etal. 2003).

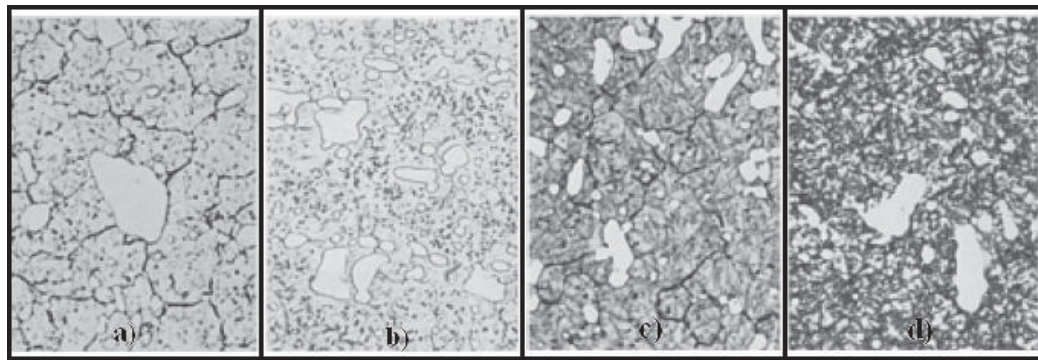


Figura 2. 4 Metalografía del acero D2, con diferentes técnicas de ataque: a) Atacada con Nital al 10% , revela los bordes de granos, carburos y Martensita ligera; b) Atacada con Picral y HCl al 4%; c) Teñida en caliente durante 5 minutos a 540 °C, después de atacar con 10% de Nital para producir mayor contraste y revelar, la austenita retenida. d) Ataque con Superpicral, revela austenita retenida como una fase blanca, igualmente revelado como fases blancas aparecen los carburos. (ASM Handbook Metallographic & Microestructure 1998).

2.4. MECANISMOS DE DESGASTE PRESENTES DURANTE LA OPERACIÓN DE CONFORMADO DE METALES

El desprendimiento de metal originado por el desgaste de una pieza puede variar notablemente, de muy intenso a insignificante. En cualquier caso, resulta de ello una pérdida de eficacia o un deterioro de la pieza. El problema de desgaste se presenta en todo tipo de sistemas industriales. Los casos más graves se presentan en determinadas industrias tales como, automotriz, minera, siderurgia, petrolera, química y eléctricas, por mencionar algunas.

La tecnología de los recubrimientos protectores y la soldadura de mantenimiento pueden contribuir a la solución de numerosos problemas de desgaste mediante la aplicación de aleaciones diseñadas específicamente para combatir cada uno de los mecanismos de deterioro superficial como la abrasión, impacto, corrosión, calor, etc.

A objeto de poder seleccionar un sistema de aleación apropiado para cada caso, es de primordial importancia poder determinar con el mayor grado posible, el tipo de desgaste al cual se le atribuye el fenómeno de deterioro superficial. De lo anterior se desprende la necesidad de conocer y entender los principales mecanismos de desgaste con los cuales se enfrenta la industria en su operación. Tanto los ingenieros responsables del mantenimiento, como de la administración de planta deben tomar conciencia del alto costo que significa la pérdida de material en sus sistemas mecánicos y estar al tanto de los beneficios que brinda la tecnología de recubrimientos protectores y la soldadura de mantenimiento.

En el caso de herramentales de conformado no se presenta un mecanismo único, si no que se presenta de una manera combinada (J. Streeter 2002). Debido a la naturaleza del proceso, el mecanismo combinado principal es el de impacto-abrasión y en un menor factor de contribución es el mecanismo de fricción, los cuales a continuación se explican:

2.4.1. ABRASIÓN

El término abrasión se emplea para describir la forma de desgaste superficial causado por el movimiento relativo de partículas duras sobre dicha superficie. El grado de abrasión depende de la naturaleza de las partículas, morfología, tamaño y dureza, además del grado de humedad de la superficie. Otros factores determinantes incluyen la presión ejercida por la partícula sobre la superficie, la concentración de partículas abrasivas, el ángulo de incidencia de éstas sobre la superficie y la velocidad relativa partículas-superficie. Ver figura 2.4-

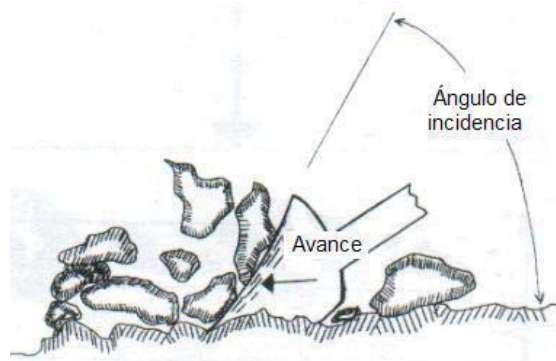


Figura 2. 5 Ángulo de incidencia de partículas abrasivas (J. Streeter 2002)

Existen diferentes tipos de desgaste como lo son:

2.4.1.1. ABRASIÓN BAJO ESFUERZO

Partículas deslizándose libremente sobre la superficie a un ángulo de incidencia pequeño. Es frecuente encontrar este tipo de abrasión presente en superficies que se deslizan entre sí en medio de partículas que ejercen altas presiones sobre dichas superficies. Como se muestra en la figura 2.5.

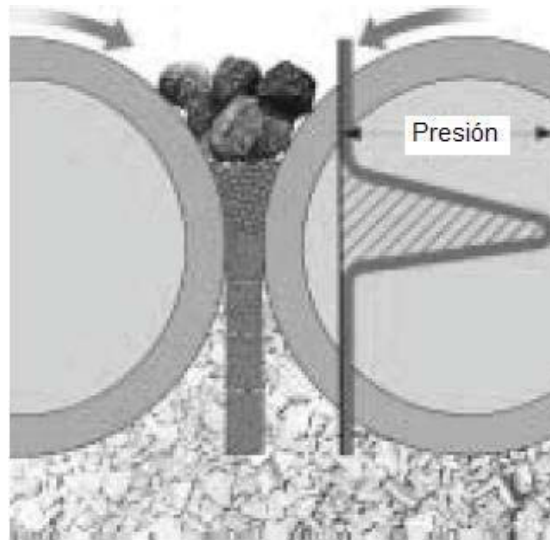


Figura 2. 6 Desgaste de abrasión bajo esfuerzo (C. Howard ,2004)

2.4.1.2. ABRASIÓN POR DESGARRAMIENTO

Este tipo de abrasión se caracteriza por la presencia de abrasivos de mayor tamaño, los que someten a la superficie a un grado de impacto y a altos esfuerzos de compresión. El ángulo de incidencia es generalmente mayor que en el caso del mecanismo de abrasión bajo esfuerzo. La remoción del material en abrasión por desgarramiento se debe a la deformación plástica, subsiguiente endurecimiento y desgarre de las partículas metálicas. Ver figura 2.6.

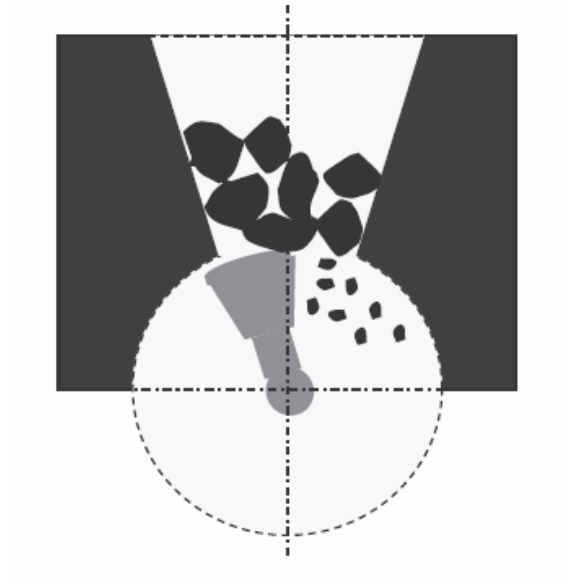


Figura 2. 7 Desgaste de abrasión por desgarramiento. (C. Howard ,2004)

2.4.2. IMPACTO

El desgaste por impacto, aun cuando no requiera mayor definición, es conveniente analizarlo desde un enfoque de transferencia de energía. Como se muestra la figura 2.7.

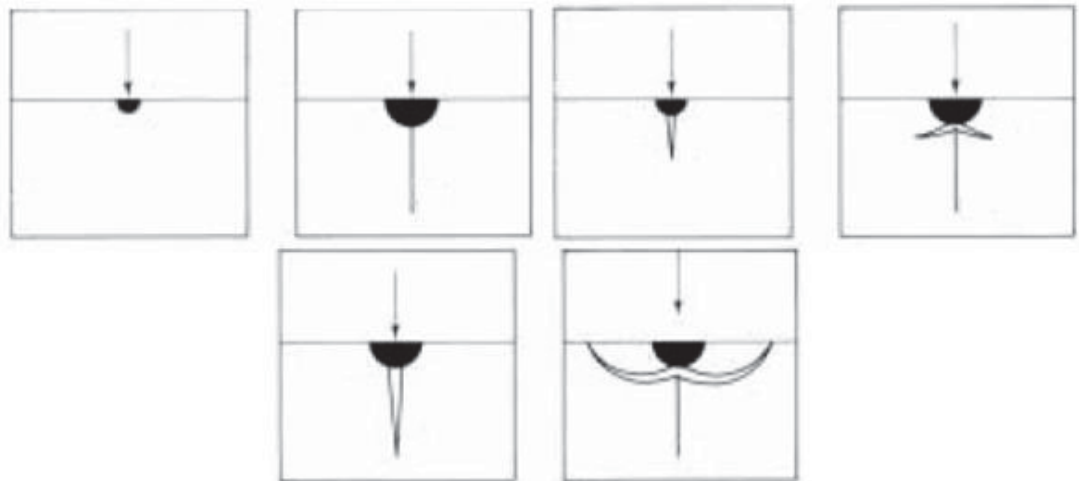


Figura 2. 8 Desgaste de impacto. (C. Howard ,2004)

Considerando la figura anterior. En ella, una partícula (metálica o no metálica) choca contra una superficie. Dicha partícula posee un cierto grado de energía

debido a la velocidad (v) que lleva y a su masa (m), esta energía cinética (E) viene expresada por:

$$E = (mv^2) / 2$$

Como se sabe, por la ley de conservación, la energía no se pierde, sólo se transforma. Para este caso, la energía acumulada se convierte, al impacto, en trabajo de deformación plástica o elástica, dependiendo de la característica de la superficie, y su habilidad de poder absorber dicha energía.

La habilidad de poder absorber la energía del impacto en un metal, viene en gran parte determinada por las características de tenacidad del mismo. La propiedad de tenacidad se puede definir como la capacidad de un metal de admitir el impacto de una carga aplicada rápidamente y depende de los valores de elongación, tensión de ruptura y ductilidad del material.

Si la superficie es frágil por el impacto puede fracturarse fácilmente, pero si es tenaz cederá por deformación elástica o plástica de forma que se evitará la fractura o al menos se retrasará. El material de impacto puede ser metálico o no metálico, por ejemplo, las contra superficies de una matriz en una prensa.

Algunos de los efectos del impacto son los siguientes: agrietamiento por fatiga, compresión y deformación. Prácticamente todos los casos de impacto producen una combinación de estos efectos y provocan un debilitamiento de la microestructura de la pieza de forma que otros mecanismos de desgaste pueden desarrollarse fácilmente como es el caso de los aceros herramienta alto carbono y cromo.

Numerosas aleaciones metálicas se endurecen mecánicamente cuando se someten repetidamente al impacto. El impacto genera fallos en la microestructura metálica (dislocaciones) como nudos, que se hacen mayores en número y se enredan con la repetición de los impactos. Estos nudos no dejan que el metal se deforme elástica o plásticamente como sucedería normalmente y por el contrario, confieren al metal un comportamiento más

frágil. Es importante disponer de una matriz tenaz y una fina microestructura, de forma que las grietas no se propaguen a través del material y provoquen grandes fragmentos. El material de protección tiende a ser grueso y debe unirse metalúrgicamente al sustrato (no proyectarse térmicamente) para permitir grandes deformaciones elásticas y plásticas con el impacto.

2.4.3. FRICCIÓN

Genera pérdida de material por rozamiento de una superficie metálica contra otra, está presente en forma amplia en todo proceso de estampado y constituye uno de los más activos agentes del desgaste de partes y piezas.

El examen microscópico de las superficies permite visualizar la microrugosidad real, que existe en piezas que en un examen macroscópico se ven pulidas. En efecto, las mismas son una sucesión de montes y valles de topografía aguda. El desplazamiento relativo de una superficie contra la otra produce el choque de aristas encontradas y se genera una deformación localizada, aumento de temperatura y ruptura de dichas caras o bordes.

Se ha constatado, además, el efecto de la soldadura, debido a elevadas temperaturas puntuales que se generan durante el proceso, entre las aristas de contacto. Dichas aristas, microsoldadas, dan lugar a remoción de metal en aquel que tenga menos dureza. Incluso, algunas de estas partículas desprendidas se ligan al metal más duro, dando lugar a la formación de una película fuertemente adherida. Por otro lado, se produce un efecto de abrasión de bajo y alto esfuerzo al existir partículas libres en el sistema, que tenderán a penetrar y/o rayar generalmente la superficie más blanda. Como se observa en la figura 2.8.

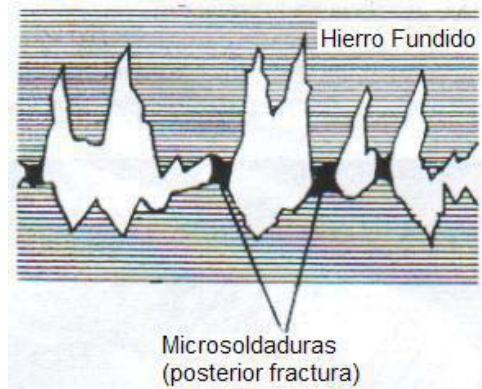


Figura 2. 9 Mecanismo de desgaste de fricción (J. Streeter 2004).

Aun cuando no existe una teoría general que explique el mecanismo de desgaste por fricción, este puede ser definido por una serie de variables que inciden en dicho fenómeno:

- Variables metalúrgicas:
 - Materiales en consideración.
 - Estructura de esos materiales y como se ven afectados por la temperatura.
 - Efecto de uno de los materiales difundiéndose en el otro.
- Variables físicas:
 - Temperaturas de fusión de los metales.
 - Dureza de los metales.
 - Conductividad térmica.
 - Capacidad calorífica.
 - Densidad.
- Variables mecánicas:
 - Modulo de elasticidad de cada uno de los metales.
 - Coeficiente de Poisson.
 - Presión de trabajo.
- Otras variables:
 - Rugosidad de las superficies.

- Tratamiento superficial.
- Velocidad relativa de las superficies en contacto.
- Presencia o ausencia de lubricación.

2.5. SOLDADURA APLICADA PARA LA RECUPERACIÓN DE LOS ACEROS PARA HERRAMIENTAS.

En este tipo de soldadura, los aspectos desconocidos en cuanto a las características de la pieza a recuperar y las restricciones que impone el usuario son dos aspectos frecuentes a encontrarse (Asociación Española de Soldadura y Tecnologías de Unión 2001). El tratamiento térmico previo puede no tenerse definido, la presencia de contaminantes pueden afectar los resultados, los esfuerzos residuales propios de la soldadura también tienen influencia marcada en la calidad de la soldadura. Otro de los aspectos difíciles de contrarrestar en ocasiones es la accesibilidad de la zona dañada, ya que se trabaja con una pieza que ya está conformada, no es el caso de una producción nueva, que puede contemplar un ensamblaje por partes (D. Cedré, et al. 2003)

Generalmente, con el objetivo de disminuir costo y tiempo de reparación, estas herramientas se sueldan en estado de temple y revenido, lo cual es una limitante fundamental en la calidad de la soldadura. Teniendo en cuenta las características anteriores puede plantearse que estos aceros presentan problemas de soldabilidad. Como defecto principal en su soldadura está el agrietamiento, tanto en el metal base como en el depósito. Los defectos del tipo macro y microgrietas que surgen en la zona de unión soldada pueden dividirse en los siguientes grupos de acuerdo al intervalo de temperaturas en que se formen (G. Lozano, et al. 2001).

1- Macro o microgrietas en caliente, son aquellas que se forman durante el proceso de enfriamiento a elevadas temperaturas en el intervalo correspondiente desde la temperatura de *solidus* (*liquidus*) hasta 900-800°C.

2- Grietas en frío, es decir, grietas provocadas por el hidrógeno, retardadas, que se forman habitualmente luego de concluida la soldadura, a temperaturas inferiores a los 200-300°C.

3- Grietas de revenido, son las que se forman después de este tratamiento térmico de la unión.

4- Grietas laminares, las cuales, aunque pueden formarse tanto a elevadas temperaturas como en estado frío y tienen una morfología típica.

En el caso de la soldadura de aceros para herramientas, dadas sus características de composición química, estructura metalográfica y propiedades mecánicas, la mayor probabilidad de surgimiento de grietas es las de los tipos 1 y 2.

Por otra parte, la dureza máxima en la zona de influencia térmica es un índice que refleja la susceptibilidad química del metal base a la formación de grietas en frío. (S. Horo 1999). Donde:

$$HV \text{ máx.} = 90 + 1050C + 47Si + 75Mn + 30Ni + 31Cr... (1).$$

Cuando este resultado es mayor de 350 HV se plantea que durante la soldadura existen probabilidades de formación, en la zona de influencia térmica de estructuras de elevada resistencia y fragilidad, las que constituyen elementos que favorecen la formación y propagación de grietas en frío o por hidrógeno. Los aceros para herramientas, como regla general, presentan una composición química tal que este índice HV máx. Alcanza un valor mayor de 350Hv, lo que implica que estos materiales son susceptibles a este tipo de defecto. (G. Lozano, J. Morgenfeld 2001).

En el caso del agrietamiento en caliente se plantea que para que el metal base no sea susceptible a la formación de este tipo de grietas (de licuación), en su composición química debe establecerse una relación Mn/S mayor de 50. En estos aceros el contenido de azufre se plantea que sea menor de 0,03.

Excepto los del grupo O y A. ver tabla 2.1, que tienen contenidos de manganeso entre 0,7 y 2% (James F. 1999), el resto de estos aceros presentan una relación Mn/S menor que 50, lo cual implica que van a poseer susceptibilidad química al agrietamiento en caliente.

Entre los procesos recomendados para la soldadura de aceros para herramienta se encuentran dos fundamentalmente, el de soldadura manual por arco con electrodo revestido por sus siglas en ingles SMAW y el de soldadura con electrodo no metálico y protección gaseosa por sus siglas en ingles GTAW, y en los últimos años se ha venido desarrollando el proceso de proyección térmica de alta velocidad por sus siglas en ingles HVOF, para la recuperación por soldadura de ciertas propiedades mecánicas y corrosión en casos específicos. En el caso del proceso SMAW y GTAW las ventajas para esta aplicación vienen dadas por su amplia gama de materiales de aporte disponible, capaz de responder a los requisitos dentro de la amplia gama de composición química que presentan estos aceros, además que brinda una protección gaseosa superior a la de otros procesos de soldadura cuando se suelda alejado de corrientes de aire, además de que se logra un enfriamiento lento del baño de soldadura, aspecto fundamental para esta aplicación en aceros de elevada templabilidad.(V Frolov 1998).

2.6. RECOMENDACIONES GENERALES PARA LA SOLDADURA DE ACEROS PARA HERRAMIENTAS

Existen recomendaciones generales para la soldadura de aceros para herramientas con el proceso SMAW, las cuales se presentan a continuación (C. Howard 2004):

- ❖ Deben seleccionarse los menores diámetros de electrodos, adecuados para la aplicación específica que se realice.
- ❖ Es necesario que la superficie sea preparada por maquinado o esmerilado, las ranuras deben tener las caras redondeadas, con un

ángulo de unión de al menos 30° de forma tal que el ángulo del fondo sea mayor que el diámetro del electrodo. Deben eliminarse todos los bordes o esquinas agudas de la zona de soldadura.

- ❖ Debe soldarse siempre alejados de corrientes de aire, debido a que el herramental es templable al aire.
- ❖ Si va a repararse una grieta deben realizarse orificios de parada en sus extremos y toda la porción agrietada ser maquinada completamente, con transiciones suaves.
- ❖ Durante la construcción y reconstrucción de bordes puede ser ventajoso el uso de soportes de cobre o barras de grafito, que contengan el metal fundido del baño de soldadura.
- ❖ Es de suma importancia la absoluta limpieza del área de la pieza que está siendo reparada, así como eliminar toda la humedad de los electrodos.
- ❖ Para las primeras pasadas se recomienda el uso de planchas para el encendido del arco.
- ❖ Es necesario utilizar el menor calor aportado posible e irlo disminuyendo para pasadas sucesivas.
- ❖ Si es posible, la pieza debe ser posicionada con una ligera inclinación ascendente, con vistas a mejorar la penetración del depósito.
- ❖ Usar una técnica de respaldo “Back step” o enmantequillado “skip weld”, especialmente cuando reparan bordes de corte en forma de anillo y matrices de extrusión. Esto permitirá una distribución de calor homogénea en la pieza soldada.

- ❖ Siempre debe ejecutarse precalentamiento a la temperatura adecuada, ya sea en hornos o en cajas aisladas, especialmente construidas con ese fin.
- ❖ Se deben depositar cordones estrechos, con un ancho igual a un diámetro o diámetro y medio del electrodo que se utiliza.
- ❖ Eliminar la escoria entre pasadas mediante cepillado.
- ❖ Se recomienda un martillado ligero al depósito en caliente (al rojo) para aliviar tensiones.
- ❖ Nunca permitir que la pieza se enfríe hasta temperatura ambiente luego de la soldadura y antes del revenido ó alivio de tensiones.
- ❖ En cuanto a la selección del metal de aporte para la soldadura de los aceros para herramientas, existen consideraciones esenciales que deben ser seguidas en función de obtener soldaduras de calidad (B. Salas 1996).
- ❖ Lo primero es tener una certeza acerca del metal base que va a ser soldado, es decir su composición química, condición de tratamiento térmico (recocido o endurecido) y los requerimientos de servicio del área a ser soldada.
- ❖ Cuando la herramienta está en condición de recocido debe utilizarse un metal de aporte de composición química similar al metal base, con vistas a que responda al tratamiento térmico que se le realizará posteriormente a la pieza.
- ❖ Cuando la herramienta está endurecida (temple más revenido) la selección del metal de aporte presenta mayor dificultad, sin embargo, existe un amplio rango de materiales posibles a seleccionar. En este caso se recomienda seleccionar un material que al enfriarse alcance

las propiedades mecánicas necesarias en la zona de la herramienta que está siendo soldada. En muchos casos este material de aporte tendrá una composición química completamente diferente a la del metal base. No se recomienda repetir, luego de la soldadura, el tratamiento de endurecimiento, debido al riesgo de grietas. (G. Lozano, J. Morgenfeld 2001).

- ❖ Si el depósito va a ser realizado en un área de la herramienta que no es de trabajo, el aspecto fundamental a lograr es la ausencia de grietas en la soldadura, para lo cual pueden seleccionarse aceros de baja aleación o inoxidable.
- ❖ Si va a soldarse en una zona de trabajo con metal de aporte de acero para herramientas deben depositarse como máximo tres capas esto debido a la distorsión del material. En caso de que se requiera un depósito de mayor profundidad debe utilizarse la técnica de enmantequillado, realizando las pasadas intermedias con electrodos de aceros de alta ductilidad, para posteriormente soldar las capas finales con metal de aporte de acero para herramientas.
- ❖ Para prevenir la formación de grietas bajo el cordón es importante precalentar, garantizar el enfriamiento lento y un bajo calor aportado al depósito.
- ❖ Finalmente realizar un relevado de tensiones inmediatamente.

2.6.1. METALES DE APORTE

Son tres los tipos fundamentales de metales de aporte a seleccionar durante la soldadura de aceros para herramientas. El primero tiene como función proveer depósitos duros, luego de la soldadura o del relevado de tensiones. Estos generalmente se incluyen como marcas propias de las empresas productoras y no cumplen con clasificaciones estándares (Lincoln Electric company 2006). Estos metales de aporte corresponden con los principales

grupos de aceros para herramientas (endurecibles en agua, aceite o aire, de trabajo en caliente o de alta velocidad) y deben seleccionarse en función de igualar las propiedades del metal base.

El segundo grupo, en el cual se incluyen los metales de aporte de aceros de bajo carbono y baja aleación, no proveen dureza a la zona soldada, si no la de ductilidad y tenacidad a los depósitos.

El tercer tipo comprende metales no endurecibles, tales como níquel y aleaciones de este, aceros inoxidable austeníticos y aleaciones de níquel-cobre. Ellos son adecuados debido a su ductilidad, lo cual evita la formación de grietas y pueden ser utilizados como capa intermedia para posteriores operaciones de acabado superficial.

Existen recomendaciones específicas para la selección del metal de aporte con vistas a la reparación de un área de trabajo, para determinados grupos de aceros (C. Howard 2004), como puede verse en la tabla 2.2.

Tabla 2. 2 Recomendaciones de composición química del metal de aporte para la soldadura, en zonas de trabajo de diferentes aceros para herramienta en estado endurecido para soldar con GTAW y SMAW. (D. Cedré, et al. 2003).

Tipo de acero grado herramienta	Composición química recomendada para el metal de aporte
W1, W2	0,95%C, 0,20%Si, 0,30%Mn, 0,20%V
S1, S5, S7, H11, H12, H13	0,33%C, 1,00%Si, 0,40%Mn, 5,00%Cr, 1,35%Mo, 1,25%W
O1, O6	1,92%C, 0,30%Si, 1,28%Mn, 0,50%Cr, 0,50%W
A2, A4, D2	0,95%C, 0,30%Si, 0,40%Mn, 5,25%Cr, 1,10%Mo, 0,25%V

2.7. PRECALENTAMIENTO

Otro factor de vital importancia dentro de la tecnología de soldadura de herramientas de conformación es el precalentamiento. Este es un paso necesario con vista a disminuir los gradientes de temperatura y las tensiones residuales de la zona de la soldadura y minimizar de esta forma el agrietamiento.

Otro aspecto a controlar en esta aplicación es la decoloración del metal base. Este es un fenómeno que ocurre en los aceros para herramientas cuando la temperatura de precalentamiento sobrepasa determinados niveles, en dependencia del tipo de material; esta sólo puede evitarse cuando se suelda en cámara de argón. (S. Thompson 1999).

En la literatura (Asociación Española de Soldadura y Tecnologías de Unión 2001), aparecen reportadas diversas recomendaciones acerca de la temperatura de precalentamiento necesaria para la soldadura de los aceros para herramientas, las cuales en muchos casos varían de una referencia a otra. En la tabla 2.3 se presentan las temperaturas precalentamiento normadas para evitar el agrietamiento en la soldadura de los diferentes aceros para herramientas y los valores máximos a alcanzar para los casos en que no se admita la decoloración.

Tabla 2. 3 Precalentamiento para la soldadura de aceros grado herramienta. (Asociación española de Soldadura y Tecnologías de Unión 2001).

Material	Temperaturas normales (°C)	Sin decoloración (°C)	Enfriamiento
A2	250-350	100-140 Máx.	Lento
D2	250-350	140-180 Máx.	Lento
D3	350-450	No recomendado	Lento
H13	150-250	110-150 Máx.	Aire
L6	200-250	110-150 Máx.	Aire
O1	250-350	100-140 Máx.	Lento
P20	150-200	100-140 Máx.	Aire

S1	200-250	110-150 Máx.	Aire
-----------	---------	--------------	------

Los aceros A2, D2 y O1 son muy sensibles al agrietamiento y deben tomarse extremas precauciones en la soldadura si se usan temperaturas de precalentamiento menores a estas recomendadas. El acero D3 es extremadamente sensible a agrietamiento aun cuando se usa la temperatura de precalentamiento recomendada.

Cuando se recomienda un rango de temperatura, la menor debe ser usada para secciones finas y la mayor para secciones gruesas o herramientas voluminosas. La temperatura de precalentamiento mínima debe ser siempre mantenida como temperatura entre pasos durante la soldadura. (G. Lozano, etal. 2001).

En la tabla 2.3 se recomiendan dos tipos de enfriamiento, al aire y lento. El enfriamiento al aire se realiza dejando enfriar naturalmente la pieza después de la soldadura, lejos de corrientes de aire. En el caso del enfriamiento lento, se debe realizar el enterramiento de la pieza en arena.

De forma general se plantea que las herramientas que tienen 60 HRC o más deben tener un precalentamiento mínimo de 350°C. Los aceros rápidos, templados y revenidos deben precalentarse como mínimo a 400°C y realizar el revenido inmediatamente después de la soldadura por una hora entre 540 - 550°C, con enfriamiento lento. Con respecto al calentamiento en el horno se plantea que independientemente del tipo de horno que se utilice, es recomendable ir elevando la temperatura a la pieza de forma gradual (M. Cugat 1999). Debe evitarse introducir la herramienta dentro del horno a temperaturas mayores de 120°C, especialmente si la herramienta contiene variedad de espesores, los cuales van a calentarse a diferentes velocidades, incrementando de esta forma la posibilidad de agrietamiento y decoloración en áreas sensibles.

Aún con el precalentamiento adecuado se pueden presentar problemas debido a la existencia de áreas de la herramienta más sensibles al agrietamiento que otras. Las principales áreas con problemas son las

cercanas a las esquinas internas. (Ver figura 2.9). Los bordes externos pueden ser problemáticos, especialmente si se ha decidido no usar precalentamiento completo.

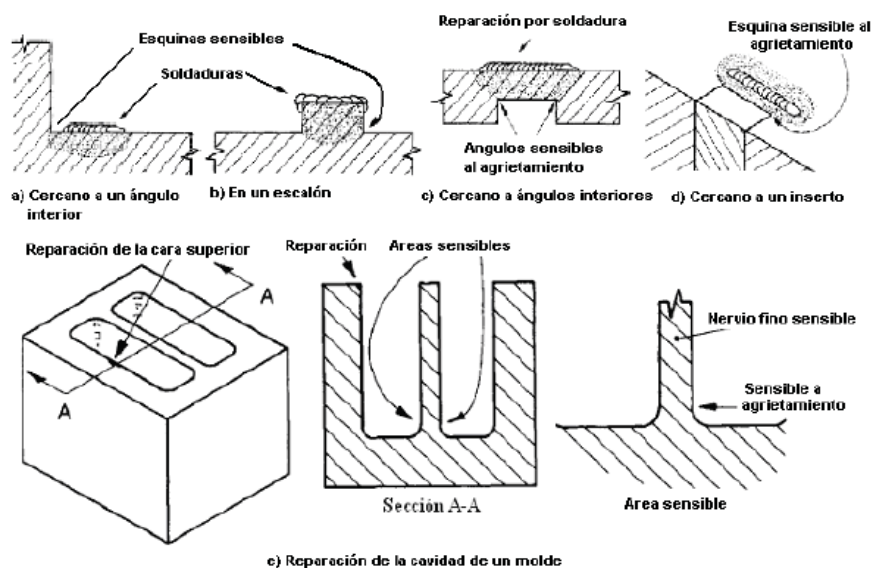


Figura 2. 10 Áreas sensibles al agrietamiento: a) Cercano a un ángulo interior, b) En un escalón, c) Cercano a ángulos interiores, d) Cercano a un inserto y e) Reparación de la cavidad en un molde. (S. Horo. 1999).

En estado de recocido la mejor práctica es permitir un enfriamiento de la unión soldada hasta aproximadamente 90°C y entonces calentarlo dentro de un rango de temperatura apropiado de 250°C a 350°C. Cuando se trabaje con metal base endurecido no debe exceder la temperatura original de revenido. Una práctica común es calentar 25-50°C por debajo de la temperatura original de revenido.

2.8. TÉCNICAS FUNDAMENTALES PARA LA REPARACIÓN DE HERRAMIENTAS POR MEDIO DE SOLDADURA.

En la soldadura de reparación de herramientas de conformado es muy común la aparición de defectos, los cuales pueden ser contrarrestados o disminuidos si se aplican las técnicas antes mencionadas. Entre estos defectos se encuentran principalmente el hundimiento de material y la socavadura. (O. Tamara 2003).

El hundimiento de material en pequeñas áreas alrededor del depósito es inevitable con los procesos de soldadura estándares, tales como el SMAW o GTAW, pero este defecto puede minimizarse usando la técnica de HVOF (J.C Tan, L Looney 1999). Este es un problema principal en la reparación de herramientas de moldeo de plásticos, especialmente si la zona a ser soldada o rellenada está por debajo de su tolerancia original y no puede eliminarse más material base. (Ver figura 2.10).

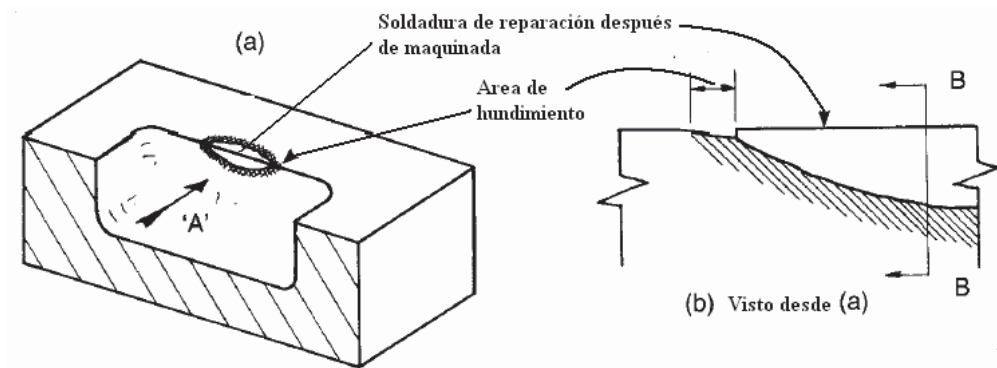


Figura 2. 11 Forma del hundimiento: a) Soldadura de reparación después de maquinado y b) Vista Transversal (S. Horo. 1999).

Para minimizar el área de hundimiento de material durante el proceso de soldadura GTAW, se necesita reducir el amperaje para depositar una o dos pasadas finas en el área de hundimiento, antes de comenzar la soldadura. Ver figura 2.11 de esta forma el hundimiento se minimiza a 0.05 – 0.0075mm.

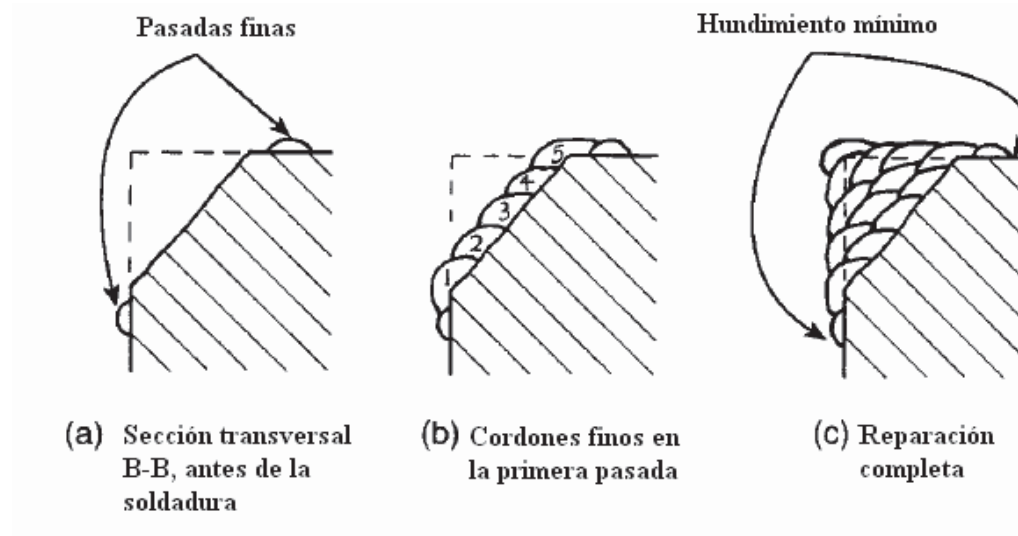


Figura 2. 12 Técnica para contrarrestar el hundimiento: a) Sección transversal antes de la soldadura, b) Cordones finos en la primera pasada y c) Reparación completa. (S. Horo. 1999).

La formación de socavadura a ambos lados del cordón es un problema que puede ser aún más severo que el hundimiento de material, ya que es muy difícil de controlar y además que ningún código la permite. Ver figura 2.12

Este defecto puede ser minimizado utilizando la técnica de arrastre (tug off), la cual se explica a continuación. Esta se aplica mayormente cuando se suelda con el proceso de soldadura manual por arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa. Antes de comenzar la pasada final del depósito, se debe limpiar cuidadosamente el área con un cepillo de alambre. Para luego partir en la realización del depósito desde el centro hasta el borde exterior del mismo, cubriendo además la zona de hundimiento de material. La varilla de aporte se debe direccionar hacia atrás, dentro del charco fundido y reducir el amperaje (esta técnica se facilita con el uso de un pedal de pie). Es necesario mantener la varilla de aporte en el charco fundido hasta que esta se haga plástica (como el vidrio líquido), arrastrar la varilla a través del borde no tocando, extinguir el arco y arrastrar la varilla mientras este en estado plástico. Luego girar el ángulo de la varilla y colocarla en el centro y hacer la misma operación hacia el borde contrario, para completar la otra mitad del depósito.

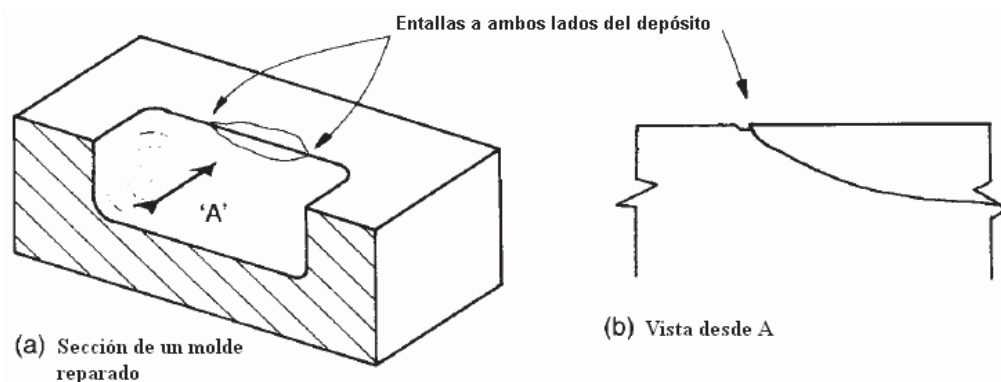


Figura 2.13 Representación de socavaduras a ambos lados de un depósito: a) Sección de moldes separados, b) Vista transversal (S. Horo. 1999).

2.9. TÉCNICA DE ARRASTRE (TUG OFF)

La técnica de arrastre (tug off) es muy complicada de realizar, esta solo podrá ser hecha por un soldador experimentado, pero a pesar de esto es práctica común en la reparación de las zonas de trabajo en herramientas de conformación. Ver figura 2.13.

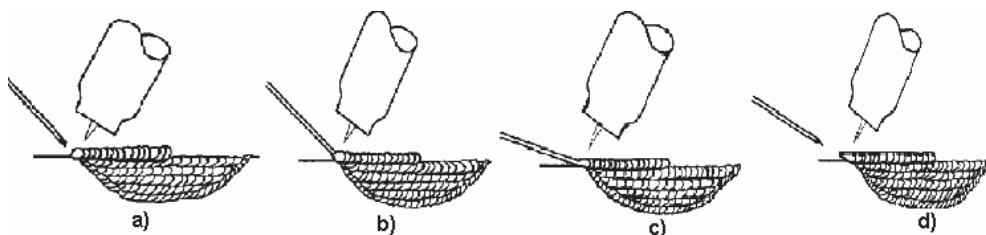


Figura 2.14 Esquema de la técnica de arrastre para contrarrestar la socavadura. a) Se deposita con sentido desde el centro hasta el borde de la zona de hundimiento b) se sitúa la varilla contra el depósito y se reduce el amperaje c) mientras el depósito está en estado plástico se arrastra la varilla hacia el borde, d) se extingue el arco y se desprende la varilla cuando aún esté en estado plástico. (B. Salas 1996).

En el caso de la reparación de herramientas partidas, la distorsión es un problema común, el cual es muy difícil de corregir luego de la soldadura, de forma que es necesario prevenir este defecto. Una de las vías fundamentales utilizadas con este fin es el uso de restricciones. En la figura 2.14 aparece una herramienta con una preparación para una soldadura, mediante esmerilado

del doble bisel en cada cara, con una holgura de 2mm. Esta herramienta se restringe como se muestra en dicha figura.

La primera pasada será por la cara restringida para luego resanar la misma por la cara posterior, de forma que se elimine todo el metal oxidado, dejando el metal limpio para completar de esta forma la pasada de raíz.

Para el llenado posterior de la preparación de bordes se recomienda realizar cordones con un orden tal que las capas del depósito sean aplicadas de forma alterna, con vistas a minimizar la distorsión.

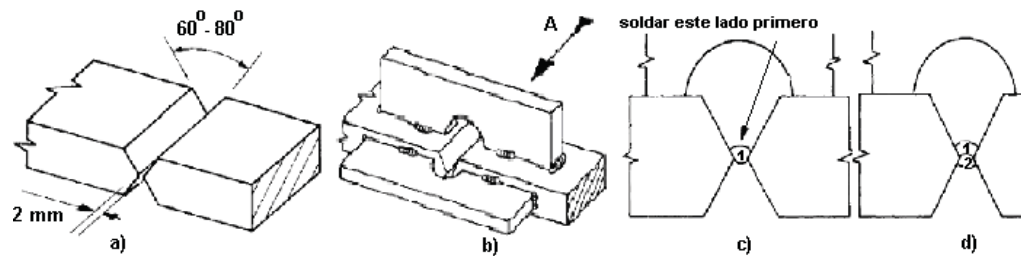


Figura 2. 15 a) sección de una herramienta a la que se le realizará una reparación mediante un depósito a tope de penetración completa b) sección completamente restringida c) vista desde A, penetración completa de la primera pasada. Siempre se debe soldar primero por el lado de la restricción d) resanar la primera pasada y completar las pasadas de raíz (B. Salas 1996).

2.10. PROCESO DE PROYECCIÓN TÉRMICA COMO ALTERNATIVA DE REPARACIÓN DE HERRAMIENTAS DE CONFORMADO

2.10.1. INTRODUCCIÓN A LA PROYECCIÓN TÉRMICA (THERMAL SPRAYING)

El origen de la proyección térmica data del año 1910, cuando Schoop proyectó polvo de metal fundido sobre una superficie por primera vez. El procedimiento consistía en fundir un metal en un crisol y proyectarlo atomizado, mediante un gas comprimido, sobre la superficie a recargar en la que se solidifica. Posteriormente, salió al mercado un tipo de pistola alimentada por un alambre, que, atravesando una llama originada por un gas combustible y otro comburente, era fundido y proyectado sobre el material a recargar, por una corriente de aire comprimido. Actualmente, los procedimientos más utilizados son:

- Proyección de polvo por combustión (Flame power).
- Proyección de alambre por combustión (Flame wire).
- Proyección de alambre por arco eléctrico (Wire arc).
- Proyección por plasma (Plasma spray).
- Detonación
- Alta velocidad (HVOF).

El proceso de proyección térmica se puede definir como "la aportación de materiales proyectados en forma de partículas fundidas finamente divididas, sobre un substrato debidamente preparado". (J.C Tan, etal. 1999).

El material a proyectar (en forma de polvo o varilla), es fundido mediante una energía obtenida a partir de la combustión de gases, de un arco voltaico o de una recombinación de gases plasmógenos, según el procedimiento empleado.

El material fundido es proyectado sobre la pieza a recubrir en estado plástico con una alta energía cinética y térmica, que ceden a la misma, ver Figura 2.15,

provocando la unión con una fuerza que va a depender del procedimiento empleado, de los parámetros utilizados, del material de aportación, del material del sustrato, así como de la preparación del mismo y de su temperatura antes, durante y después de la proyección. Los valores obtenidos para esta fuerza de anclaje pueden llegar a superar los 80 MPa.

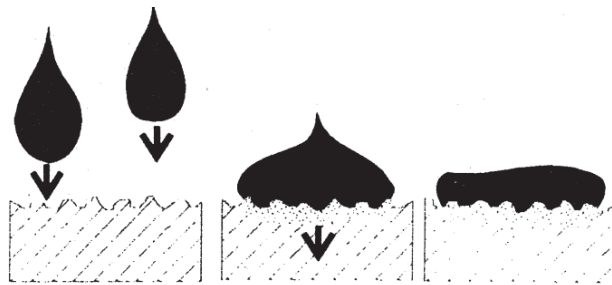


Figura 2. 16 Formación de la capa (ASM Handbook 1998)

Tendrán también importancia en la calidad de un recubrimiento las reacciones químicas entre partículas, el tamaño de las mismas, (lo que va a influir en la transferencia de calor al sustrato), así como la forma de la pieza, la velocidad relativa de la pistola con relación a la pieza, el ángulo de incidencia de las partículas sobre la pieza, la distancia de proyección, etc.

Los pasos que se deben seguir en un proceso de proyección térmica son los siguientes:

- 1.- Limpieza de la superficie a recubrir.
- 2.- Preparación de dicha superficie (generalmente mediante un granallado con arenilla de óxido de aluminio o granalla angular metálica).
- 3.- Proyección de la capa de anclaje, o de la capa directamente en el caso de que esta última sea autoanclaje.
- 4.- Mecanizado o rectificado final del recubrimiento si es necesario.

Cabe destacar que, durante el proceso de proyección térmica, el material a recubrir no debe superar los 150°C para evitar los cambios estructurales o tensiones añadidas, lo cual implica que la proyección térmica puede ser

considerada como un "recargue en frío", con excepciones tales como el sinterizado. (D. A. Shifler et al. 2000). Siendo de entre los recubrimientos de proyección térmica, el de proyección por plasma el que se ha mostrado resultados satisfactorios, realizaremos una descripción más detallada de dicho proceso.

Esta técnica de proyección puede ser empleada con una amplia variedad de materiales, incluidos los cerámicos y con un elevado rendimiento. Su empleo disminuye el riesgo de degradación del revestimiento y del sustrato, en comparación con otros procesos a altas temperaturas.

2.10.1.1. CAÑÓN DE PLASMA

Desde el año 1970, la técnica de la proyección por plasma ha experimentado una profunda evolución, a pesar de lo cual, el diseño del cañón empleado para la proyección de dicho plasma apenas ha sufrido modificaciones (L. Lonney 1999).

Este dispositivo, que aparece ilustrado en la figura 2.16, consta de dos electrodos: un cátodo en forma cónica situado en el interior de un ánodo cilíndrico, que se extiende más allá del cátodo, formando una boquilla en su extremo. La refrigeración de los electrodos durante el proceso, se realiza por medio de unos circuitos con agua en circulación en su interior, lo que evita la fusión de dichos electrodos.

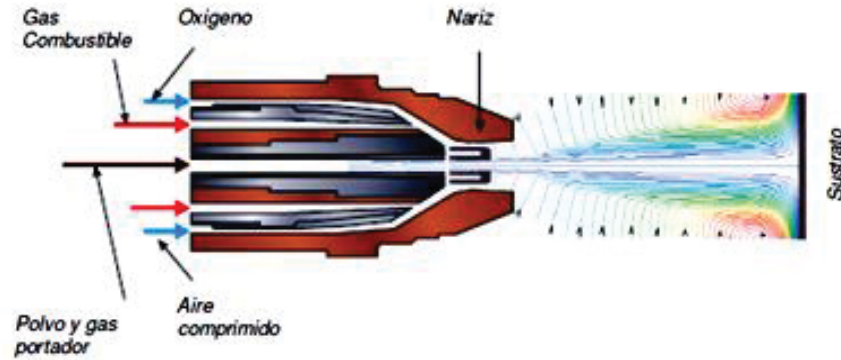


Figura 2. 17 Cañón de plasma-spray (ASM Handbook 1998).

El cañón comienza a operar cuando un impulso de corriente crea un arco entre los dos electrodos. Este arco es mantenido por una corriente estacionaria de elevada intensidad y con un potencial de alrededor de 50 voltios.

Un gas inerte fluye a través del espacio comprendido entre los dos electrodos, el cual y debido al arco eléctrico establecido disocia sus moléculas en sus átomos constituyentes ionizándolos. De este modo, el gas existente en el interior del arco se transforma en un conjunto de iones y electrones muy energéticos, es decir, un plasma. La corriente en su recorrido entre los dos electrodos alcanza la boquilla del cañón, formando allí una llama de plasma. Tanto la temperatura como la velocidad de dicho plasma alcanzan velocidades hipersónicas y temperaturas superiores a los 3000°C (J.C. Tan 1999).

2.10.1.2. INYECCIÓN DEL POLVO

El material que va a originar el revestimiento es transportado por medio de un gas portador, e inyectado en la llama de plasma, pudiendo estar el inyector de polvo situado en el interior o en el exterior de la boquilla.

La llama de plasma, acelera las partículas de polvo inyectadas, fundiéndose estas debido a la elevada temperatura del plasma. Estas gotas de material fundido salen dirigidas hacia la superficie del material a recubrir el sustrato;

donde solidifican y acumulan, originando un recubrimiento protector grueso y compacto.

El criterio básico para la deposición de la proyección térmica de alta velocidad utilizado es que las partículas deben fundirse completamente, sin una excesiva vaporización, y permanecer fundidas hasta que colisionen con el substrato. Si las partículas no se funden suficientemente, puede resultar un recubrimiento de pobre calidad.

2.10.1.3. PARÁMETROS A CONSIDERAR

a) GASES PLASMÓGENOS

En la práctica, el argón o el nitrógeno son los gases primarios utilizados, junto con adiciones que varían entre el 5% y el 25%, de un gas secundario, normalmente hidrógeno o helio. Estos gases secundarios como el hidrógeno, adquieren una gran energía debido a la disociación de sus moléculas, que unido a la energía de ionización, origina el contenido calorífico del plasma. No obstante, la limitación en porcentaje de los mismos es debida al efecto negativo que tienen en la erosión de los electrodos.

b) TAMAÑO DE PARTÍCULA DE POLVO

Para cada material de revestimiento y para cada cañón de plasma existe un tamaño adecuado de las partículas del polvo, oscilando éste entre 5 y 60 μm . Ver figura 2.17. Un tamaño superior al adecuado originará que las partículas no lleguen a fundirse, con lo cual podrán separarse de la llama o rebotar en el substrato sin adherirse a él. Por el contrario, un tamaño inferior al adecuado puede producir la vaporización de dichas partículas. (T. S. Sidhu, S. Prakash 2005).

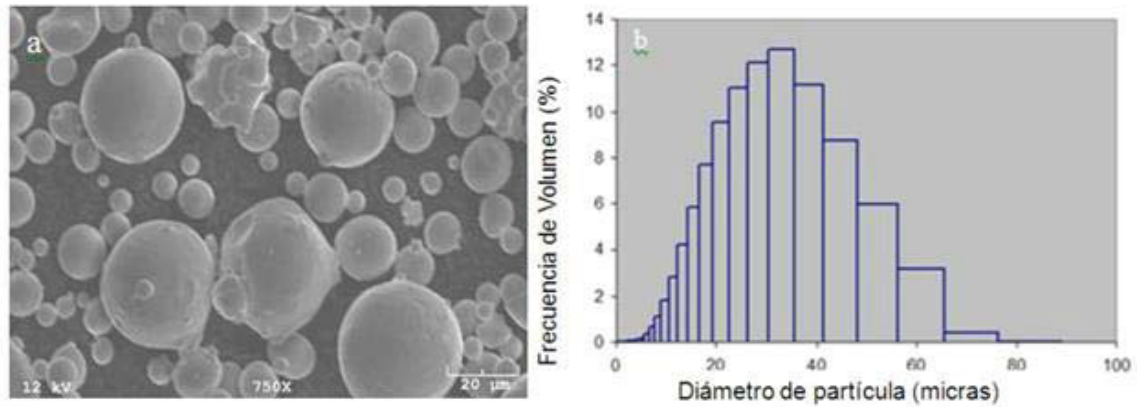


Figura 2. 18 Tamaño de partícula y distribución en recubrimiento de acero D2 (T. S. Sidhu, etal. 2005).

c) MODO DE INYECCIÓN DEL POLVO

La forma en que las partículas se introducen en la llama condiciona su fusión y posterior deposición. La presión del gas portador del polvo, debe estar convenientemente ajustada para que las partículas lleguen a la llama, pero sin atravesarla. El flujo de gas requerido se determina en función de:

1. Diámetro de la manguera de transporte.
2. Densidad del polvo.
3. Tamaño y forma del polvo.
4. Velocidad y densidad del gas portador del polvo.

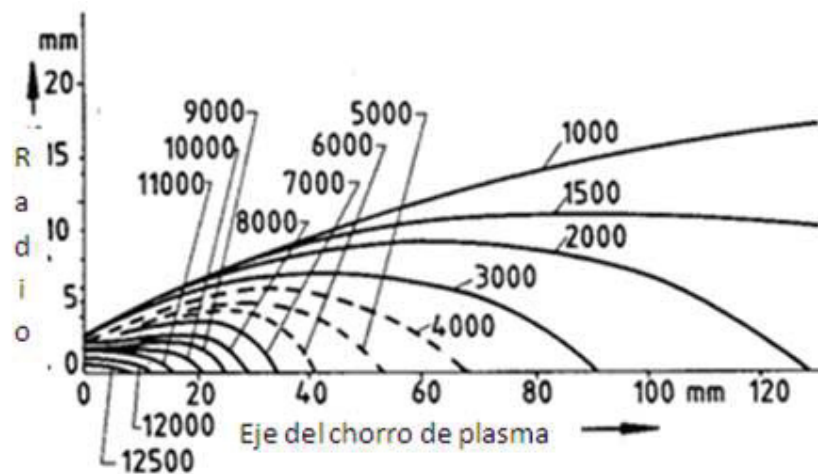
d) DISTANCIA AL SUBSTRATO

Cuando la proyección se realiza en presencia con el aire, las partículas de polvo comenzarán a enfriarse y desacelerarse al chocar contra las moléculas del aire, una vez que han abandonado la llama de plasma. Por lo tanto, un factor básico a considerar es la distancia entre el cañón y la superficie a revestir, la cual suele oscilar entre los 5 y los 10 centímetros cuando la proyección se realiza en contacto con el aire. La eficacia de la proyección varía en función de la distancia de proyección (T. S. Sidhu, S. Prakash 2005).

e) VELOCIDAD DE LAS PARTÍCULAS

La velocidad de salida del plasma es del orden de los 600 m/seg, observándose que las partículas de polvo de mayor tamaño responden más lentamente a la aceleración imprimida por el gas, y que dichas partículas una vez aceleradas perdían velocidad más lentamente que el propio gas. La variación de la velocidad de las partículas de polvo en función de la distancia de proyección, aparece reflejada en la figura 2.18.

a)



b)

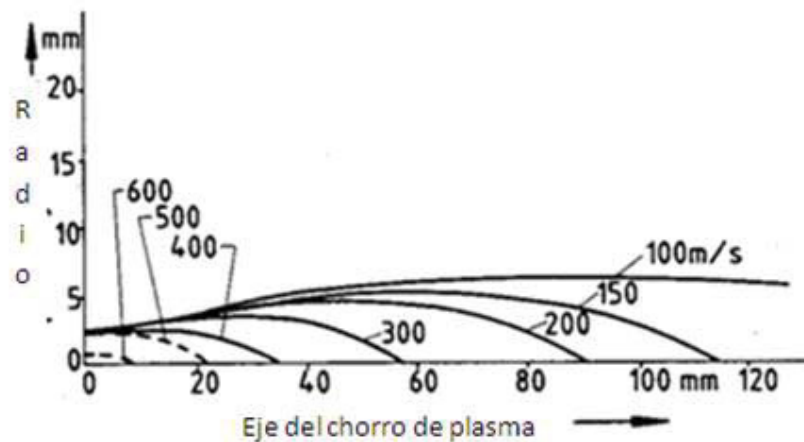


Figura 2. 19 a) Temperatura del plasma y b) velocidad de partícula (ASM Handbook 1998).

f) INTERACCIÓN DE LAS PARTÍCULAS CON EL SUBSTRATO

Cuando las partículas de polvo fundidas llegan al sustrato, colisionan con él; dicho sustrato ha de haber sido previamente sometido a un proceso de limpieza y de acabado superficial que le confiera cierta rugosidad para que aumente la adhesión del recubrimiento. Estas partículas se solidifican y van recubriendo todas las irregularidades del sustrato con el material proyectado (figura 2.19). Las partículas continúan llegando y acumulándose sobre el revestimiento en una cuantía que dependerá de la superficie a revestir y de la velocidad con que el cañón se mueva sobre dicha superficie.

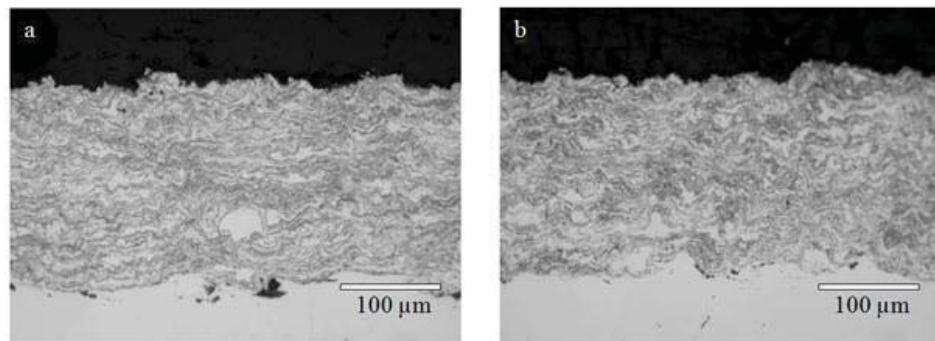


Figura 2. 20 Formación de un recubrimiento, (J. Saaedi T. etal. 2009).

g) ATMÓSFERA DE PROTECCIÓN

Las propiedades que presente la capa depositada influirá de un modo decisivo el tipo de atmósfera en el que se realice la proyección. Según como sea dicha atmósfera, existirán dos posibles métodos de proyección: (plasma en el aire y plasma en el vacío.)

En el primer caso, APS (air plasma spraying), por sus siglas en inglés, el proceso de proyección se produce en condiciones atmosféricas ambientales. Debido al efecto protector del haz inerte del plasma y los cortos períodos de estancia de las partículas en el plasma, las posibilidades de reacción del polvo con el aire son bastante limitadas. Los polvos de metales reactivos o de aleaciones pueden oxidarse algo en la superficie.

La elevada velocidad de solidificación y enfriamiento da lugar a que las estructuras de las capas de plasma sean de un grano muy fino, presentando mayor resistencia al desgaste.

El segundo de los métodos de proyección VPS (vacuum plasma spraying), por sus siglas en inglés se emplea cuando se exige que las capas depositadas necesitan una mayor densidad, pureza, ausencia de óxidos y adherencia; en este caso la proyección se debe realizar en una cámara con atmósfera inerte. En la proyección plasma en vacío, la presencia de argón evita la reacción no deseada entre la atmósfera y el haz de plasma, el material de base o el material proyectado. El resultado son capas de mayor densidad, mejor adherencia y cohesión y estructura óptima.

2.11. APLICACIONES

Las aplicaciones por proyección de plasma se han extendido considerablemente hasta el momento, siendo las principales las que se indican a continuación: (E. Turunen 2005)

- Protección contra diferentes mecanismos de desgaste: abrasión, adhesión y erosión.
- Protección ante los siguientes tipos de corrosión: oxidación, corrosión por gases calientes, atmosférica y corrosión por inmersión.
- Aislamiento térmico.
- Reparación de piezas con desgastes o defectos localizados.
- Superficies que deben reunir cualidades especiales:
 - Aumento de la superficie específica.
 - Recubrimientos con superficie activa o inerte.
 - Aislamiento o conducción eléctrica.
 - Aislamiento o conducción térmica.
 - Capas autolubricantes.
 - Superficies con propiedades catalíticas.
 - Barreras de difusión.
 - Recubrimientos decorativos.

- Recubrimientos de absorción o reflexión luminosa.
- Aplicaciones especiales:
 - Fijación de sondas.
 - Fabricación de cuerpos con forma complicada.
 - Fabricación de sensores.
- Afino y esferizado de polvos.

2.11.1. ALTA VELOCIDAD (HVOF)

La proyección térmica de alta velocidad (HVOF) por sus siglas en inglés es el nombre genérico de la familia de procesos de revestimientos en cuyo material de revestimiento es calentado rápidamente en un gas caliente medio, y simultáneamente proyectado a gran velocidad dentro de una superficie de una sustancia la cual se construye hasta producir el revestimiento deseado.

En las últimas tres décadas las demandas de las industrias con alta tecnología, la industria aeroespacial, la industria automotriz, han liderado grandes avances en el campo de rociado térmico. Nuevos materiales usados en esa industria frecuentemente requieren alta energía para ser procesados, y este desafío ha sido conocido en considerables sucesos. Ahora es posible rociar virtualmente cualquier material siempre que se derrita (o sea sustancialmente fundido) sin una degradación significativa durante una permanencia corta en la fuente de calor. Otro avance ha sido la mejora de las propiedades de revestimiento, y particularmente la reducción de la porosidad en los revestimientos. Esto ha sido alcanzado por el uso de nuevos métodos de post-tratamiento en los revestimientos rociados térmicamente, incluyendo compresión ultrasónica, presión isostática caliente y martilleo. Algunos procesos de rociado térmico también proveen una muy buena superficie final, la cual es ahora de gran ocupación y regulación ambiental. (J.C. Tan, et al. 1999).

La cadena entre las partículas rociadas es primeramente mecánica, seguido de partículas individuales pueden ser empujadas si las presiones de corte son excesivas. Para aplicaciones en donde la superficie terminal es importante, es difícil de lograr el rociado para materiales con estructura porosa. Factores los cuales influyen en la elección del método final, incluye el tipo de material que será terminado, la forma de la parte, el final y tolerancia requerida y su economía. Herramientas de carbono son generalmente usadas para el maquinado de materiales para revestimiento fuertes como los cerámicos, carburos y cementados. Herramientas de ángulos, velocidad de superficie y alimentación son críticas en el éxito del maquinado de estos revestimientos. Herramientas de ángulo inadecuadas y herramientas de presión pueden resultar excesivas en partículas de salida y destrucción de la ligadura sustrato de revestimiento.

El desgaste de componentes ingenieriles es un problema considerable en las aplicaciones industriales. El desgaste puede ser causado por deslizamiento, impacto, abrasión, erosión y otras condiciones de servicio. El daño es progresivo, frecuentemente involucrando considerable pérdida de material. Mientras especificaciones inapropiadas de materiales en contacto con componentes pueden causar un pequeño incremento en el coeficiente de fricción, la velocidad de desgaste correspondiente puede variar alrededor de muchos órdenes de magnitud. En la figura 2.20 se muestran algunas matrices de acero grado D2, reparadas por la técnica de HVOF, en la cual se obtiene una mejor resistencia al desgaste y se logra prolongar la vida útil del componente.

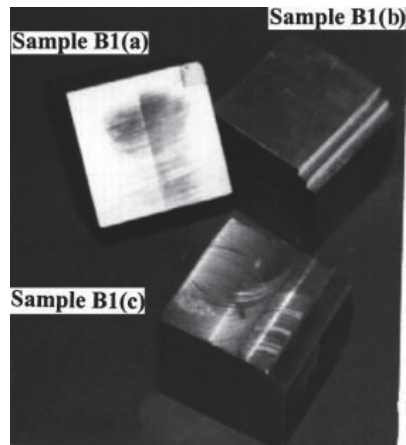


Figura 2. 21 Muestras de matrices reparadas por la técnica de HVOF (J.C. Tan, et al. 1999).

La proyección térmica de alta velocidad es una alternativa eficaz y rentable para la restauración de componentes desgastados. Nuevas superficies pueden ser provistas sin el material de distorsión causado por soldadura. Además, la nueva superficie puede ser creada usando el mismo material como el de la base, o con más desgaste o resistencia de corrosión del material.

El proceso de maquinado de un componente que fue restaurado por la técnica de proyección térmica es complicado ya que los revestimientos adheridos están compuestos por partículas bien definidas y poca conductividad térmica comparada con el mismo material forjado, la adhesión del material con el sustrato tiene que ser suficientemente fuerte a resistir las fuerzas que involucran el corte. En la figura 2.21 se muestra un ejemplo de la microestructura de una matriz D2 reparada por el proceso HVOF.

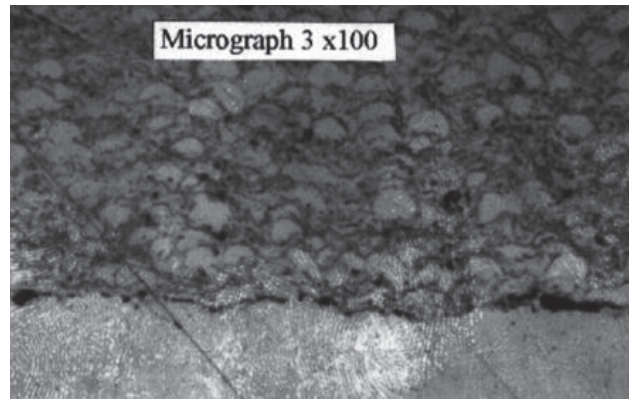


Figura 2. 22 Recubrimiento en la microestructura de un acero grado D2, antes del maquinado. (J.C. Tan, etal. 1999).

La gran velocidad del oxí-gas (HVOF) técnica de rociado térmica ha sido ampliamente adoptada en muchas de las industrias debido a su flexibilidad y costo-eficacia. Es normalmente utilizado para aplicar revestimientos a componentes para protegerlos contra el uso, calor y/o corrosión, pero a su vez tiene el potencial de reconstruir componentes desgastados. Como lo es el objetivo principal de este trabajo, la técnica de rociado HVOF para la reparación de acero grado herramienta (D2) dañadas. La tabla 2.4 detalla aplicaciones posibles del revestimiento HVOF en varias áreas industriales.

Tabla 2. 4 Principales aplicaciones de HVOF a nivel industrial (T. S. Sidhu, S. Prakash 2005).

Industria	Aplicación	Material
Papel	Ductos, rollos	WC-CO-Cr, Cr ₂ O ₃
Acero	Desgaste, recubrimientos protectores	Cr ₂ O ₃ -Ni-Cr
Recubrimientos antioxidantes	Exteriores que funcionan como vista	Cr ₂ O ₃
Electrónica	Materiales conductores	Cu
Construcción		Al ₂ O ₃ -Mo
Automotriz	materiales sometidos a fricción y desgaste	Al ₂ O ₃ -Mo- WC-CO-Cr, Cr ₂ O ₃ -Ni-Cr

La alta velocidad del proceso de HVOF está basado en una combinación de energía de transferencia térmica y cinética, la fusión y el aceleramiento de partículas en polvo, para depositar los revestimientos deseados. Las partículas en polvo del material de revestimientos deseado son alimentadas axialmente a una corriente de gas caliente, luego a una pistola de rociado y fusionado, propulsados a la superficie con el trabajo de ser revestidas. Los gases de hidrógeno-carbón (propano, propileno, acetileno) o hidrógeno puro son usados como combustible de gases y la temperatura del gas depende de la elección del combustible de gas. La pistola consta de tres secciones: una zona de mezclado, la zona de combustión, y la boquilla. Durante la operación el cuerpo de la pistola es enfriado por aire o agua. El combustible y el oxígeno son mezclados por medio de chorros coaxiales y guiados a la zona de combustión donde una flama piloto o una ignición externa inician la combustión. Durante la combustión, el gas puede ser expandido en la boquilla, donde este es acelerado. El polvo es acelerado por un gas transportado e inyectado a una flama. El polvo tiene la misma dirección del flujo como el gas circundante expandido. En la entrada la zona de combustión a través de la boquilla las partículas de polvo son calentadas y son aceleradas. Debido a la alta velocidad y el alto impacto del polvo rociado, el revestimiento producido es menos poroso y tiene una mayor densidad del recubrimiento que es producido por otros métodos. La figura 2.22 indica las características de los revestimientos HVOF comparados con aquellos producidos usando el proceso de rociado estándar de plasma.

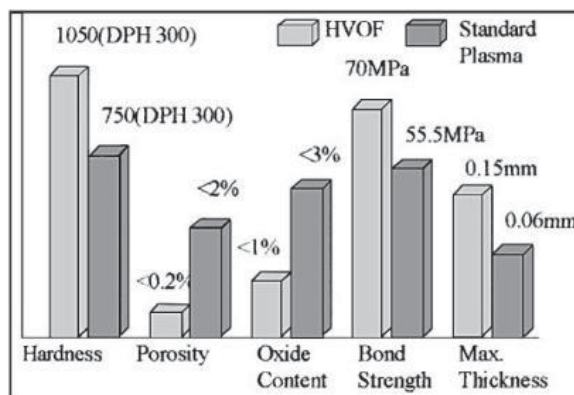


Figura 2. 23 Características de los revestimientos HVOF comparados con aquellos producidos usando el proceso de rociado estándar de plasma. (P.K. Ghostho 1992).

Los componentes de rociado térmicos de HVOF contienen tensiones residuales que resultan de la contracción durante el enfriado y la solidificación. La magnitud de las tensiones varía dependiendo sobre los parámetros del proceso, usado en el rociado de revestimientos. El material revestido puede romperse si la magnitud de la resistencia a la tensión de los esfuerzos residuales excede su adhesión con fuerza al sustrato. Los mecanismos que son generalmente usados para reducir la fuerza residual en los revestimientos incluidos: expansión de la fuerza de sustrato de rociado por precalentamiento, con la selección de un material de revestimiento con propiedades semejantes al sustrato se logra que exista una combinación físico-química que provee una mayor adherencia entre los materiales aplicados por proyección térmica. Los procesos de aplicación se caracterizan por calentar y proyectar el material y luego impactar las partículas fundidas o semifundidas formando laminillas por la solidificación y apilación de éstas sobre el material a reparar. Estas pequeñas partículas se solidifican extremadamente rápido debido a que colapsan con una gran cantidad de masa, área del sustrato y el calor son liberados velozmente trasladándolo a éste y al ambiente. (J.R. Davis 2004).

2.12. PROPIEDADES DE LOS RECUBRIMIENTOS APLICADOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA DE ALTA VELOCIDAD

Es necesario conocer las propiedades de los recubrimientos aplicados por proyección térmica y entender la relación que pueden tener estas con su desempeño en las condiciones en las que van a ser utilizados.

También es importante conocer cuáles son los parámetros del proceso que tienen que ser aplicados para obtener propiedades determinadas, debido a que las propiedades de los recubrimientos dependen de la magnitud de la energía térmica y energía cinética, la interacción de esta energía con el material depositado en partículas y la interacción de las partículas con el sustrato utilizados en el proceso (L. Pawlowski 1995). Es por esto, que uno de los principales intereses en investigación es conseguir las variables óptimas

del proceso para poder obtener un determinado recubrimiento con buenas propiedades, para que se desempeñe y cumpla con una determinada función en el ámbito industrial y automotriz como lo es el caso del conformado de herramientas para trabajado en frío. Las principales variables del proceso de la proyección térmica son:

- En cuanto a la antorcha (equipo para la aplicación), hay que tener en cuenta la geometría de la antorcha (diámetro de la boquilla), composición y flujo de los gases.
- En cuanto a la corriente de proyección se debe tener en cuenta el perfil de temperatura, velocidad de la corriente, distancia de proyección y el ambiente.
- En cuanto al material de alimentación (polvo) se debe tener en cuenta el tamaño y forma de las partículas, así como las propiedades físicas y químicas del material de alimentación.
- En cuanto al sustrato se debe tener en cuenta su rugosidad, la temperatura de precalentamiento, su coeficiente de dilatación térmica y las propiedades físicas y químicas del sustrato.

Cuando la energía total (cinética + térmica) o las variables mencionadas no son adecuadas, se pueden producir defectos como porosidad y partículas sin fundir, lo que afectaría su desempeño, especialmente ante la aplicación de esfuerzos sobre los recubrimientos, cuando son sometidos a contacto con otra superficie. Por otro lado, si la velocidad de enfriamiento después de aplicado el recubrimiento no es controlada adecuadamente, los esfuerzos residuales formados pueden generar grietas en su estructura o su desprendimiento del sustrato (J. Rodríguez 2003). En la Figura 2.23 se muestran los defectos estructurales que se presentan en los recubrimientos depositados por proyección térmica y el desprendimiento de un recubrimiento que puede ser ocasionado por los esfuerzos residuales y por la diferencia en los coeficientes de dilatación térmica entre el recubrimiento y el sustrato.

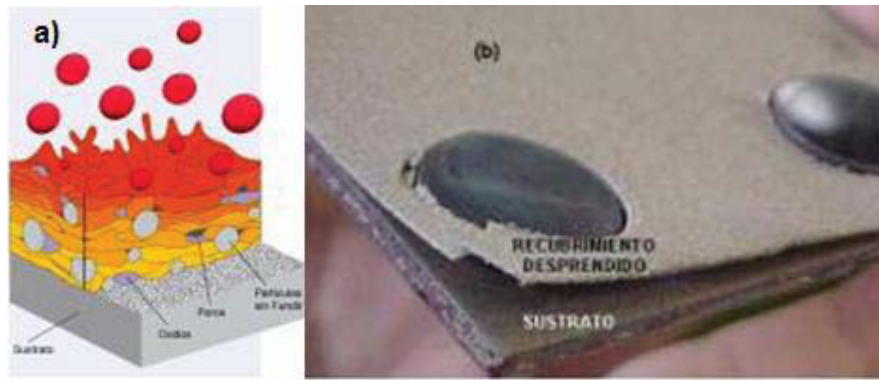


Figura 2. 24 Defectos producidos en los recubrimientos en el proceso de proyección térmica. (a) Defectos Estructurales. (b) Desprendimiento del recubrimiento. (J. Rodríguez 2003).

2.13. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS APLICADOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA

a) MICROESTRUCTURA

La investigación de la microestructura es un paso intermedio y necesario entre el procesamiento de los recubrimientos y el logro de buenas propiedades para una determinada aplicación. La descripción completa de la microestructura de un recubrimiento debería contener la siguiente información. (L. Pawlowski 1995):

- Composición química del material y del sustrato.
- Morfología de las partículas fundidas y su orientación.
- Defectos, tales como poros y distribución de las fallas de apilamiento o dislocaciones.
- La distribución de las características anteriores a diferentes profundidades del recubrimiento (L. Pawlowski 1995).

Las características microestructurales de un recubrimiento aplicado por proyección térmica combinadas con otras características (como propiedades mecánicas, químicas tribológicas, etc.) determina las propiedades de recubrimiento, éstas abarcan la estructura de: partículas laminares, partículas

no fundidas o resolidificadas, poros, inclusiones de óxidos, fases, grietas e interfases de enlace. Así estos recubrimientos constan de una estructura densa y resistente, altamente anisotrópica, consistente en la unión de partículas fundidas en forma laminar (“splats”) por que se orientan paralelamente a la superficie del sustrato y otra que consta de los espacios vacíos o poros y las grietas interlaminares presentes en éste (Piedra 2007).

b) PARTÍCULAS LAMINARES

Las partículas laminares “Splats” por sus siglas en inglés, es un término dado a la estructura aplanada que se obtiene cuando las partículas proyectadas golpean al sustrato como se muestra en la Figura 2.24 (a). Muchas de estas láminas se traslapan y se adhieren unas con otras, solidificándose y formando el recubrimiento. Así, es como el Splat, es la estructura básica de la construcción de un recubrimiento depositado por proyección térmica que son creadas cuando las partículas son fundidas y aceleradas e impactan en una superficie preparada. Las gotas fundidas que llegan son generalmente esféricas, y al impactar con la superficie del sustrato se extienden y llenan los intersticios subyacentes (espacios). Si estos intersticios no son llenados quedan espacios entre las laminillas, lo que se va a convertir en poros que van a hacer parte del recubrimiento (J.R. Davis 2004). En la Figura 2.24 (b) se muestra la estructura laminar superficial de un recubrimiento de Fe-Cr-Mo aplicado por proyección térmica por combustión de oxígeno-acetileno.

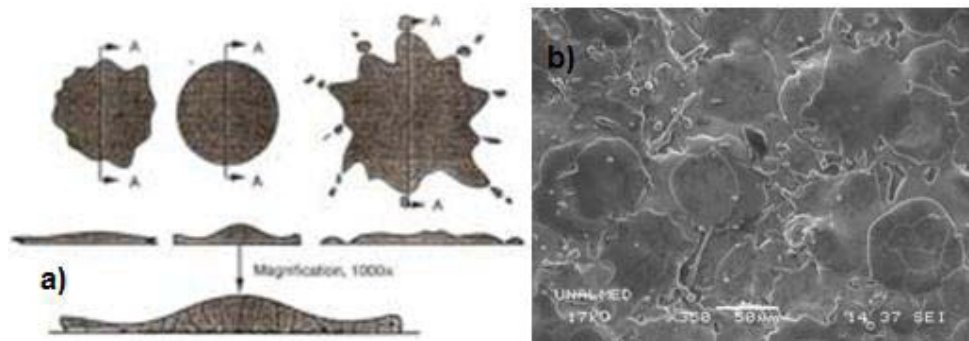


Figura 2. 25 (a) Estructura laminar, típica de la proyección térmica. (R. Davis 2004). (b) Superficie de un recubrimiento de Fe-Cr-Mo, aplicado por proyección térmica por combustión (x350). (J.R. Davis 2004).

La forma de las laminillas en la microestructura de un recubrimiento Fe-Cr-Mo, es un indicativo del grado de fusión logrado por las partículas. En el proceso de proyección térmica, cuando la velocidad de las partículas aumenta y/o la viscosidad disminuye entonces el grado de esparcimiento de las laminillas se incrementa. Esto refleja aparentemente, que un alto aplanamiento de las partículas formará un recubrimiento con baja rugosidad superficial, mientras que un bajo aplanamiento de las partículas formará un recubrimiento con una alta rugosidad y una mayor densidad. Cuando la velocidad, temperatura y grado de oxidación de la partícula aumentan, el grado de aplanamiento de las partículas incrementa (R. S. Lima, et al. 2001). Con todo lo anterior, establece que el grado de aplanamiento y de fusión de las partículas laminares en los recubrimientos determina la cohesión, porosidad, adherencia y subsecuentes propiedades físicas, mecánicas y químicas del recubrimiento (J.R. Davis 2004).

Otra derivación que tiene las partículas cuando impactan contra el sustrato, es que, durante su solidificación y posterior enfriamiento, la partícula experimenta múltiples esfuerzos térmicos que afectan la adhesión entre las partículas y por ende la integridad estructural y propiedades del recubrimiento. Además, estos esfuerzos se pueden convertir en esfuerzos residuales los cuales van a influir en las propiedades mecánicas, tribológicas, corrosión y a la fatiga del recubrimiento, dichas propiedades denotan la calidad del depósito en el sustrato, para el caso de los herramientas para trabajado en frío. En el acero grado D2, es de suma importancia controlar la calidad de la reparación mediante la técnica de HVOF ya que están sometidos a constantes cargas de impacto abrasión, este mecanismo de desgaste combinado es el principal problema en los dados para conformado.

c) POROSIDAD

La porosidad es otra característica trascendental que influye de manera importante en las propiedades finales del depósito. En la mayoría de casos se considera nocivo ya que ocasiona concentradores de esfuerzo que propician una mala adherencia, por lo tanto, disminuye las propiedades

mecánicas. En la microestructura de los recubrimientos, las laminillas o capas que no tienen una totalidad de contacto entre ellas mismas, forman regiones de sin coalescencia. (R. S. Lima, et al. 2001). Dado lo anterior, los poros que se forman en la interfase del acero grado herramienta y la aleación Fe-Cr-Mo, van a influir como concentradores naturales de esfuerzos y la pérdida del recubrimiento en el material a reparar, es por eso que es muy importante el poder disminuir la cantidad de óxidos presentes en la interfase del material reparador y el sustrato, al aumentar el área de contacto de las partículas fundidas con el material a reparar por la técnica de HVOF, en las herramientas de conformado ayuda a tener una mejor coalescencia entre los componentes propiciando una mayor adherencia y una mayor densidad del recubrimiento (R. S. Lima, A. Kucuk 2001). Por lo tanto, existe una gran influencia de los factores microestructurales en las propiedades mecánicas y tribológicas del recubrimiento, por la misma razón, actuarían como concentradores de esfuerzos donde el comportamiento mecánico es determinado por el grado de contacto entre partículas fundidas y una cohesión entre las capas depositadas generando una mayor adhesión entre el revestimiento con el sustrato. Es natural que otros factores microestructurales como óxidos o partículas sin fundir o semifundidas, van a intervenir en el comportamiento mecánico de los recubrimientos.

Con relación a la influencia en las propiedades tribológicas, la porosidad crea una pobre cohesión y adherencia entre las partículas fundidas que permite una mayor tasa de desgaste y de corrosión que con una menor cantidad de óxidos presentes en la interfase metal soldadura. La disminución en la adherencia entre las partículas ocasiona un anticipado agrietamiento de los moldes reparados, defectos tales como pérdida del recubrimiento, falta de cohesión entre las partículas, porosidad en la interfase puede interconectar el depósito con el sustrato, permitiendo que sustancias corrosivas como lo pueden ser lubricantes para disminuir el coeficiente de fricción corroan no sólo al recubrimiento sino también al sustrato. Otro efecto en la porosidad es la disminución de la dureza, lo cual ayuda a un acabado superficial deficiente, cabe señalar que una menor dureza disminuirá la resistencia al desgaste de recubrimientos sometidos a las condiciones severas como lo son las del

conformado en frío, que están en constante mecanismos de desgaste de impacto, abrasión, fricción principalmente y generara fragmentos desprendidos del material reparador y del sustrato, los cuales también producen agentes abrasivos, incrementando así las tasas de desgaste y por lo tanto una vida útil del herramental menor a lo provisto por el material seleccionado para proveer un incremento en la propiedades tribológicas del componente.

Para evitar esto, en la industria automotriz, en el área de conformado en frío, se máquina y rectificada la superficie aplicada por el proceso de HVOF antes de someterlo a servicio. Estudios establecen que la técnica del análisis de imagen mediante el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) es un método confiable de caracterización de las interfases en cuanto a la porosidad en recubrimientos aplicados por proyección térmica (S. Deshpande, A. Kulkarni 2004, A.J. Allen, J. Ilavsky 2001). La porosidad en una microestructura puede ser fácilmente detectada por el microscopio electrónico de barrido, debido al alto grado de contraste entre las zonas oscuras (poros) y las zonas más reflectantes (sustrato) en una sección transversal del recubrimiento.

d) INCLUSIONES DE ÓXIDOS.

Las inclusiones de óxidos no metálicos se producen en los recubrimientos en materiales de acero grado herramienta D2 generalmente tienen aspecto de fases oscuras, son alargados y se encuentran orientados paralelamente a la interfaz con el sustrato. Los óxidos no metálicos producidos por la interacción entre las partículas / atmósfera / temperatura de la superficie del recubrimiento durante su aplicación, la relación combustible Oxígeno que va de la mano con la temperatura son la causa de la formación de óxidos en la superficie del recubrimiento y la generación de estos propicia la falta de adherencia entre las interfases del material reparador y el sustrato. La interacción de las partículas semifundidas con su entorno, generalmente aire o mezcla de gas, conduce a la formación de películas en superficie (J.R. Davis 2004). Si hay un exceso de óxidos en la interfase, estos pueden interferir con la adherencia entre las laminillas conduciendo a disminución de la resistencia del depósito.

En algunos casos para la aplicación de resistencia al choque térmico se prefiere la formación de estos óxidos ya que pueden aumentar resistencia a la temperatura y bajar conductividad térmica del recubrimiento. Esto se usa en aplicaciones donde se encuentra presente mecanismos de corrosión y un calor excesivo como lo pudieran ser calderas ó intercambiadores de calor.

e) SUPERFICIE DE LOS RECUBRIMIENTOS

Las superficies exhiben una determinada rugosidad. Las características de la textura de la superficie son descritas por el arreglo, forma y tamaño de elementos individuales que dan lugar a la rugosidad tales como picos, crestas y valles de una superficie. En la Figura 2.25 se muestra una representación esquemática de la superficie (Z. Gahr, etal. 1987).

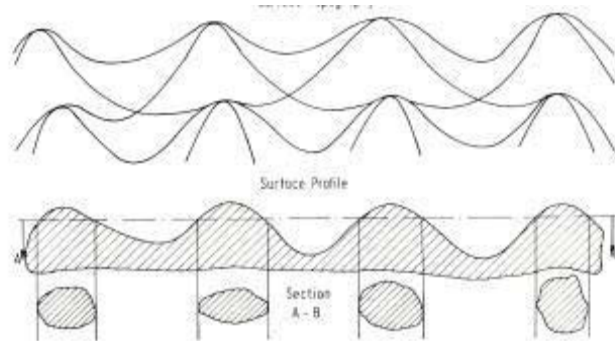


Figura 2. 26 Representación esquemática de las irregularidades de una superficie (Z. Gahr, etal. 1987).

La rugosidad como se mencionó anteriormente es un factor importante ya que ayuda a obtener mejores resultados de resistencia al desgaste y corrosión. Diferentes técnicas ópticas y mecánicas se utilizan para determinar las características geométricas a nivel macroscópico y microscópico de las superficies. En la figura 2.26 se muestra un perfil obtenido mediante la técnica de perfilometría a dos tipos de recubrimientos aplicados por proyección térmica HVOF.

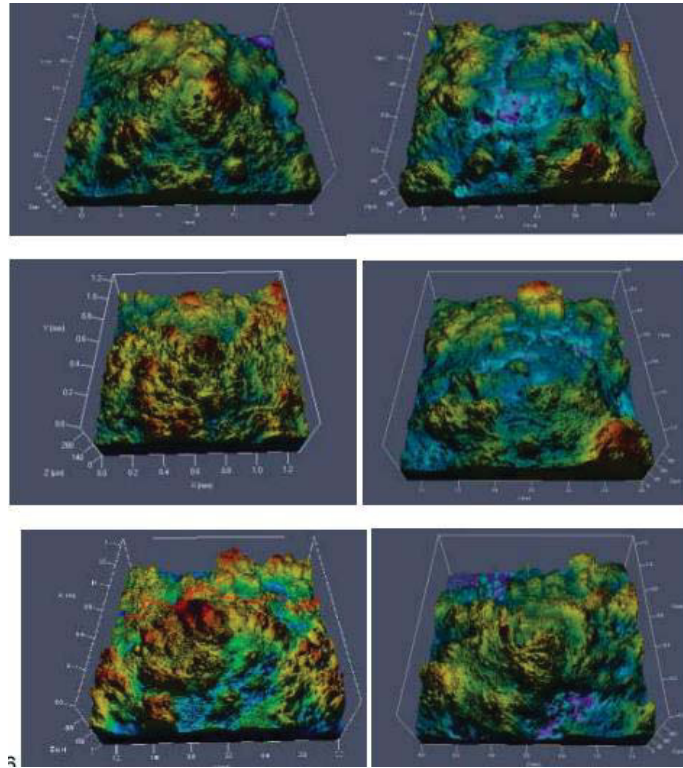


Figura 2. 27 Perfilometría de Recubrimientos aplicados por proyección térmica. (a) Fe-Cr-Mo. (J. Saaedi T. etal. 2009)

En general, los parámetros utilizados para medir la rugosidad oscilan en cuantificar las alturas de los valles, crestas y picos de la superficie que está bajo el análisis (M. Hinojosa, 2001].

Habitualmente los parámetros más usados para la caracterización de la rugosidad en ingeniería son: la rugosidad rms (Root Mean Square), rugosidad promedio (R_a), la altura de los picos, crestas y valles (R_t) y la máxima altura del pico al valle (R_{max}). La medida más utilizada es R_a , que es el promedio aritmético de los valores absolutos de las alturas $y(x)$ medidas a partir de una línea central (Figura 2.27), y está definida por la siguiente Ecuación. (ASM Internacional 1992).

$$R_a = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} y(x) dx$$

Donde L es la longitud de muestreo (R. S. Lima, A. Kucuk 2001).

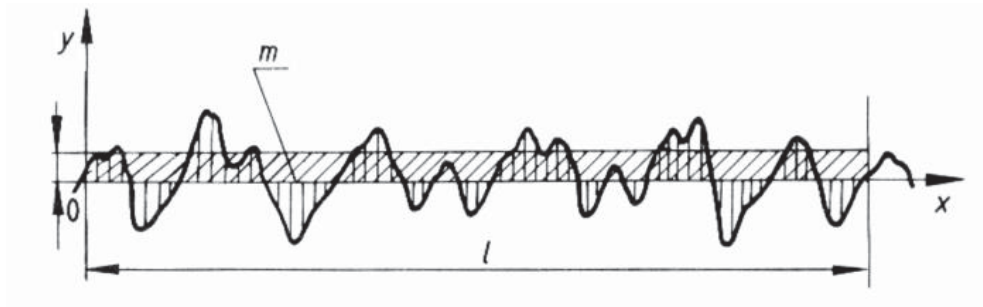


Figura 2. 28 Representación esquemática de la medición de la rugosidad promedio Ra de una superficie. (R. S. Lima, etal. 2001).

A su vez R_{rsm} se define por la siguiente ecuación

$$R_{rsm} = \sqrt{\frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} [y(x)]^2 dx}$$

El promedio R_{rsm}, representa las desviaciones con respecto a la altura promedio, es decir, es la desviación estándar de las alturas (Figura 2.28). (ASM Internacional 1992).

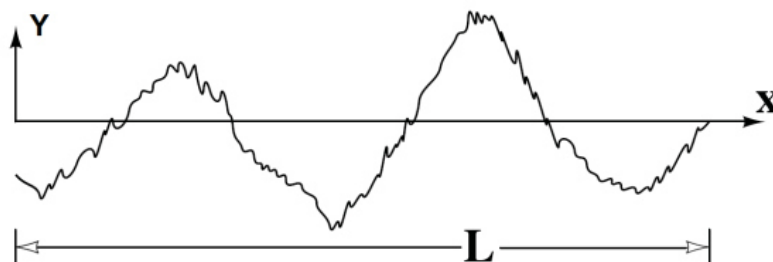


Figura 2. 29 Representación esquemática de la rugosidad Rq o Rrms de una superficie (R. S. Lima, etal. 2001).

En proporción con los recubrimientos aplicados por proyección térmica, la rugosidad de su superficie refleja el grado de fusión, coalescencia y la fuerza con que las partículas llegan al sustrato, es decir, en trayectoria y refleja el grado de compresión de las partículas durante la formación de la capa del sustrato. Por ende, una rugosidad con una menor dureza es el reflejo de una superficie plana en donde las partículas adquieren una mayor área de contacto y anclaje todo esto es a nivel microscópico, incrementando la

adherencia entre capas del recubrimiento y disminuyendo el grado de porosidad (R. S. Lima, et al. 2001).

Las propiedades mecánicas de los recubrimientos dependen fuertemente de su microestructura, especialmente, de la porosidad entre las interfases y de la forma y el área de contacto verdadero entre las laminillas (splats) que la conforman, así como de las fases microestructurales presentes. A un mayor grado de contacto entre las capas que conforman al recubrimiento, más compacta es la estructura y por lo tanto, menor será la porosidad y se obtendrá una mayor densidad del recubrimiento; y estas características ligadas a las propiedades de la selección del material de revestimiento como lo es la composición química del material y a los parámetros de proceso; estas dos últimas determinan las fases y los constituyentes presentes en el depósito así como sus características, son las que definen las propiedades del material reparado, como lo son: dureza, resistencia al desgaste y tenacidad. Es por eso que los resultados de las propiedades mecánicas constantemente son acompañados con los parámetros del proceso de aplicación térmica del recubrimiento (L. Pawlowski 1995). Las propiedades mecánicas relacionadas con la aplicación de la técnica HVOF en la reparación de herramientas de conformado en frío son: Dureza, microdureza, tenacidad a la fractura, módulo de elasticidad principalmente.

El ensayo de dureza Vickers es comúnmente utilizado en la medición de las propiedades mecánicas de los recubrimientos depositados por proyección térmica. Es importante tomar en cuenta que los recubrimientos aplicados por HVOF generalmente poseen un comportamiento anisotrópico, es decir que obtienen propiedades diversas en función de la dirección en que se realice el ensayo de dureza, generalmente tienen mayor dureza en la dirección perpendicular a su superficie es decir en la dirección paralela a la superficie del recubrimiento, hay que tener muy presente que el espesor de los depósitos aplicados por HVOF debe ser al menos 10 veces mayor a la huella dejada por la indentación Vickers (L. Pawlowski 1995). Estos resultados del ensayo de dureza ayudan a determinar la resistencia al desgaste del recubrimiento la cual es una propiedad tribológica que ayuda a incrementar la vida útil del

herramental reparado bajo la técnica no convencional de HVOF. En la figura 2.29 se muestra una representación esquemática de las indentaciones aplicadas en un recubrimiento aplicado por proyección térmica.

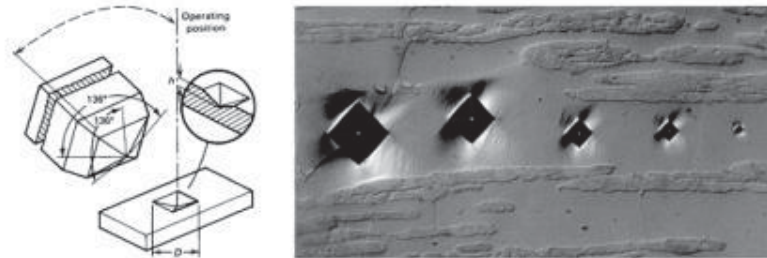


Figura 2. 30 Representación esquemática del ensayo de dureza Vickers (ASM Internacional 1992)

2.14. PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS DE RECUBRIMIENTOS APLICADOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA (HVOF)

La tribología es la rama de la ciencia que estudia los mecanismos de desgaste, fricción y lubricación que se originan en el contacto entre superficies sólidas en movimiento. La tribología se enfoca básicamente en el estudio de tres fenómenos:

- El desgaste como el fenómeno de fricción, impacto abrasión y sus combinaciones de los mecanismos de desgaste.
- La fricción entre dos cuerpos sólidos.
- La lubricación.

Para comprender mejor la tribología y sus interacciones superficiales se requiere de una serie de conocimientos con los cuales interactúa las propiedades tribológicas como lo pueden ser: tecnología de materiales, mecánica de sólidos, mecanismos de desgaste, transferencia de calor, lubricación, principalmente (Karl Heinz, et al. 1999). En sus inicios, la tribología solo comprendía exclusivamente mecanismos relacionados con el deslizamiento y lubricación para disminuir los coeficientes de fricción debido a que en aplicaciones tecnológicas prácticas es lo que se llevaba a cabo. El

rápido desarrollo de la tribología sin lubricación se debe a la aparición de los recubrimientos duros como lo es el caso de las aleaciones Fe-Cr-Mo ya que la disponibilidad de procesos para proveer recubrimientos como lo es la técnica de proyección térmica, con los cuales se pueden lograr propiedades tribológicas y de resistencia a la corrosión superiores (Z. Gahr, et al., 2005). Hoy en día existe un considerable conocimiento teórico acerca de las propiedades tribológicas de superficies recubiertas por la técnica de HVOF, sin embargo, el conocimiento en el campo práctico como es la reparación de herramientas para trabajado en frío es muy escaso, debido a los parámetros de prueba que intervienen en cada caso, como lo son las diferentes geometrías de contacto, diferentes ambientes, tamaños y formas de las partículas, química de los depósitos, etc. lo que hace complicado comparar o establecer el desempeño de un recubrimiento con base en la información existente acerca de esta temática.

Las propiedades tribológicas de los recubrimientos Fe-Cr-Mo son, en general, de suma importancia en sus aplicaciones y proveen una gama interesante de propiedades superiores como lo es una mayor resistencia al desgaste, propiedades de recubrimiento contra la corrosión, temperatura y lo más importante es capaz de generar nuevas superficies para incrementar la vida útil de los herramientas.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA UTILIZADA

Los cupones de prueba para la aplicación de las técnicas convencionales GTAW y la técnica no convencional de proyección térmica de alta velocidad, La selección de un material revestido adecuado envuelven más que la elección de las propiedades deseadas del depósito. La consideración de este debe ser dada a las condiciones, así como la función del revestimiento y el servicio del entorno, en suma, a las propiedades físicas y químicas del revestimiento y del sustrato.

La utilización de sustratos como el acero grado herramienta para trabajado en frío, fueron reparadas usando también un “herramienta de acero correspondiente”, cinco diferentes materiales de aporte fueron empleados a fin de encontrar la química del electrodo que sea capaz de proveer la resistencia propiedades mecánicas y tribológicas semejantes a las del material base. Para el caso de la aplicación por proyección térmica de alta velocidad se utilizó un aporte en polvo (Fe-Cr-Mo). Todas las muestras tienen las mismas dimensiones totales, son bloques rectangulares de cuyas medidas aproximadas son de 15cm x 5cm para el caso de la experimentación con GTAW y 1” pulgada (25.4 mm) de largo por ¼” de pulgada (6,35 mm) de altura.

Para el caso de la técnica de proyección térmica de alta velocidad Como se muestran en las figuras 3.2 y 3.3 respectivamente. Todas las muestras fueron maquinadas, desgrasadas y preparadas con arena de óxido de aluminio inmediatamente antes del rociado del recubrimiento, las muestras fueron precalentadas en un rango de temperatura de 250 a 350 °C usando flama de la pistola de HVOF y un soplete de gas, esto para reducir la diferencia de expansión térmica entre la soldadura y el sustrato. Posteriormente fueron cubiertas con el material reparador y la soldadura en toda la cara superior de la muestra hasta espesores en el rango 0,5 a 1,5 mm para el caso del HVOF y 10mm para el proceso GTAW. El proceso de HVOF fue llevado a cabo de acuerdo a los parámetros de rociado listados en la tabla 3.1, para el caso de las soldaduras por GTAW se elaboró un procedimiento de soldadura enlistado en la tabla 3.2. Todas las experimentaciones fueron llevadas a cabo siguiendo la siguiente metodología establecida en la figura 3.1.

El equipo Sulzer Metco DJ 2700 Diamond Jet Gun fue usado para la aplicación del polvo, inyectando un gas propileno. Polvo fue alimentado mediante la inyección de nitrógeno con un caudal de 47 g/min. Los materiales de aporte empleados para la reparación de herramentales de conformado de acero grado herramienta por método convencional (GTAW) se utilizaron los siguientes materiales de aporte, M2, S7, Weartech 6, Stellite 12, UTP A673.



Figura 3. 1 Desarrollo experimental

Para el desarrollo experimental se utilizaron dos procesos de soldadura, la técnica GTAW la cual se emplea en la reparación convencional de aceros grado herramienta AISI/SAE D2 (punzones, matrices, dados de conformado) y la técnica no convencional de proyección térmica de alta velocidad HVOF, la cual puede aplicar diversos revestimientos sin la afectación térmica causada en los procesos convencionales de arco, debido a que la distorsión es un parámetro fundamental en la restauración de estos aceros se optó por probar diversos materiales de aporte a fin de evaluar su comportamiento de resistencia al desgaste.

La selección de un material revestido y aporte de soldadura adecuado envuelve más que la elección de las propiedades deseadas del depósito. La consideración de este debe ser dada a las condiciones, así como la función y el servicio del entorno, en suma, a las propiedades físicas y químicas del revestimiento, aporte y sustrato. El uso de sustratos como el acero grado herramienta para trabajado en frio, fue reparado usando también un “acero de herramienta correspondiente” en polvo (Fe-Cr-Mo) para reparar materiales para el caso del HVOF y cinco tipos de aporte para el caso del GTAW, estos

aportes fueron seleccionados debido a las propiedades de alta dureza y resistencia al desgaste ya que su composición química es capaz de proveer formación de carburos primarios en la matriz, por lo que los aportes seleccionados para la aplicación del proceso convencional GTAW buscan proporcionar diversas propiedades de superficie, esto con el fin de evaluar su comportamiento a los fenómenos de desgaste (abrasión-impacto) presentes en el proceso de conformado. En la Figura 1 se muestran parte de los recubrimientos realizados por la técnica a) TIG, b) aplicación por HVOF y la infraestructura usada para su deposición, por el proceso c) HVOF. Todas las muestras usadas con la técnica HVOF tienen las mismas dimensiones totales, son bloques rectangulares de 1" pulgada (25.4 mm) de largo por ¼" de pulgada (6.35 mm) de espesor, mientras que las usadas por la técnica GTAW en los diversos revestimientos tienen dimensiones de 4 ¼ pulgadas (108 mm) de largo por 2 pulgadas (50.8 mm) de ancho por ¼" de pulgada (6.35 mm) de espesor, lo cual se ilustra en la Figura1.

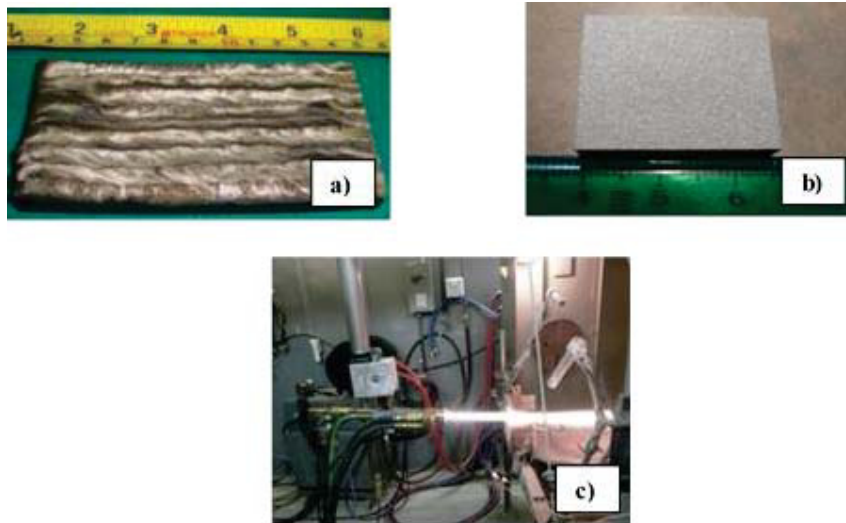


Figura 1.- Recubrimiento metálico sobre sustrato realizado por a) TIG, b) HVOF, e infraestructura empleada para deposición de recubrimientos y c) Equipo HVOF.

Las muestras fueron maquinadas, desgrasadas y preparadas con el abrasivo de óxido de aluminio inmediatamente antes del rociado del recubrimiento, las muestras fueron precalentadas en un rango de temperatura de 250 a 350°C

usando flama de la pistola de HVOF y un soplete de gas, esto para reducir la diferencia de expansión térmica entre la soldadura y el sustrato.

Posteriormente fueron cubiertas con el material reparador y la soldadura en toda la cara superior de la muestra hasta espesores en el rango 0.5 a 1.5 mm para el caso del HVOF y 10 mm para el proceso GTAW. El proceso de HVOF fue llevado a cabo de acuerdo a los parámetros de rociado listados en la Tabla 1, para el caso de las soldaduras por GTAW se elaboró un procedimiento de soldadura enlistado en la Tabla 2.

Tabla 1. Condiciones experimentales para el proceso HVOF.

Variable	Nivel Bajo	Nivel Medio	Nivel Alto
Relación Propileno/oxígeno	0.30	0.40	0.50
Distancia (mm)	200	225	250

Tabla 2. Parámetros de soldadura utilizados en la reparación del
herramental por GTAW con distintos tipos de aporte.

Especificación de electrodo	AWS A5.18
Diámetro del electrodo	1/8" (3.2 mm)
Tipo de polaridad y corriente	CDEN
Rango de Amperaje	145-148 amps
Tipo de electrodo	EW-Th2
Rango de voltaje	13-14 volts
Velocidad de avance	4 a 5 pulg/min (100-127 mm/min)
Técnica	Oscilante
Diámetro de boquilla de salida del gas	1/2" (12.7 mm)
Tipo de gas	Argón 99.95%
Limpieza entre pasos	Cepillo y alambre
Precalentamiento	250 a 350°C
Postcalentamiento	540°C

3. Materiales y Aplicación del HVOF y GTAW

El polvo comercial de gas atomizado Fe-Cr-Mo proporcionado por la empresa (Sulzer Metco Inc.,) fue usado para su estudio. La composición química y el tamaño de la partícula es mostrado en la Tabla 3. El equipo Sulzer Metco DJ 2700 Diamond Jet Gun fue usado para la aplicación del polvo, inyectando un gas propileno. Polvo fue alimentado mediante la inyección de nitrógeno con un caudal de 47 g/min. Los materiales de aporte empleados para la reparación de herramientas de conformado de acero grado herramienta por método convencional (GTAW) se utilizaron los siguientes materiales de aporte, M2, S7, Weartech, Stellite 6 y Stellite 12. Las composiciones químicas se muestran a mayor detalle en la Tabla 4.

Tabla 3. Especificación del polvo utilizado para la aplicación mediante HVOF.

Polvo	Composición (% en peso)									Tamaño de la partícula (µm) nominal
Fe-Cr-Mo (Diamalloy 1008)	Fe	Cr	Mo	Ni	Si	Cu	B	C	Mn	-45 +/- 5.5 µm
	Balance	17	11	3	3	3	4	0.4	0.1	

Tabla 4. Composición química de los materiales de aporte utilizados en la reparación por el método de GTAW.

Especificación	% en peso								
	C	Co	Cr	Fe	Mo	Ni	Si	V	W
M2	0.78 - 1.05	---	3.75 - 4.50	Bal.	4.50 - 5.50	0.3 Max.	0.20 - 0.45	1.75 - 2.20	5.50 - 6.75
S7	0.45 - 0.55	---	3.00 - 3.50	Bal.	1.30 - 1.80	---	0.20 - 1.00	0.20 - 0.30	---
Weartech	1.10	Bal.	28.00	3.00 Max.	---	3.00 Max.	1.10	---	4.00

Stellite 12	1.40 - 1.85	Bal.	29.50	2.50	---	3.00 Max.	1.50	---	8.50
Stellite 6	1.1	Bal	28.2	---	1.28	2.1	----	----	5.2

Un diseño de experimentos del tipo Taguchi fue usado en el estudio para evaluar el efecto de los dos parámetros (relación flujo del combustible/oxígeno, y distancia de trabajo) sobre la trayectoria de las partículas en cuanto a la velocidad y la temperatura de la misma como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5. Diseño de experimentos tipo Taguchi.

Parametro Experimento	Flujo de Combustible (SLPM*)	Flujo de Oxígeno (SLPM*)	Distancia (mm)	Relación Propileno / Oxígeno
1	85	240	200	0.30
2	85	240	225	0.30
3	85	240	250	0.30
4	85	210	200	0.40
5	85	210	225	0.40
6	85	210	250	0.40
7	85	170	200	0.50
8	85	170	225	0.50
9	85	170	250	0.50
10	85	240	200	0.30
11	85	240	225	0.30
12	85	240	250	0.30
13	85	210	200	0.40
14	85	210	225	0.40
15	85	210	250	0.40
16	85	170	200	0.50
17	85	170	225	0.50
18	85	170	250	0.50

*SLPM litros estándar por minuto

Una vez recubiertas y soldadas las muestras fueron preparadas metalográficamente bajo la norma ASTM E-3. Las muestras pulidas a un acabado espejo fueron atacadas químicamente bajo la norma ASTM E-407.

Con el fin de revelar la microestructura se empleó Picral y HCl al 4%, después se realizó en ensayo de dureza en el recubrimiento, material base y en la soldadura bajo la norma ASTM E-384, con un penetrador de diamante con ángulo de 136° , en escala Hv500 con una carga de 500 grf. Con equivalencia a HRC. Se realizó las pruebas de desgaste con la técnica Pin-Ball-Disc con el fin de evaluar el mejor deposito, asimismo se realizó la prueba de adherencia bajo la norma ASTM C 297/C 297M y bajo la norma ASTM D 4541. Por último, se realizó el análisis del depósito en el sustrato usando un microscopio electrónico de barrido marca Jeol con el fin de evaluar la calidad de la unión.

Para la obtención de los valores de desgaste se utilizó la técnica de Pin-Ball-Disc con equipo T-07 Abrasive wear testing machine, ver Figura 2, este ensayo se realizó a las muestras descritas en la Tabla 4, los parámetros de ensayo se describen en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros utilizados para el ensayo de desgaste

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Bola de desgaste	100Cr6	Dimensión	6.00 [mm]
Geometría	Esférica	Radio	9.50 [mm]
Angulo	45.00	Carga	5.00 [N]
Frecuencia	1.71 [Hz]	Temperatura	25°C
Ciclos	400.0 [ciclos]	Velocidad de Adquisición	50.0 [hz]



Figura 2. Aspecto general del dispositivo utilizado para el ensayo de desgaste

3.1.3 PRUEBAS MECÁNICAS

3.1.3.1 ENSAYO DE DUREZA

Para pruebas de microdureza Vickers, se utilizaron las probetas realizadas en el análisis metalográfico se llevaron a cabo de acuerdo a la norma ASTM E384 con durómetro marca Future Tech FM7 y una carga de 500g.

3.1.3.2 ENSAYO DE ADHERENCIA

El ensayo se realizó de acuerdo a la especificación ASTM E 8/03 utilizando un equipo TINIUS-OLSEN (60 TON.), La Prueba de adherencia bajo la norma ASTM C 297/C 297M – 04 y bajo la norma ASTM D 4541 – 02



Figura 3. 2 Maquina de tensión marca TINIUS-OLSEN

3.1.3.3 ENSAYO DE RESISTENCIA AL DESGASTE

Se realiza utilizando un equipo T-07 Maquina de desgaste abrasivo, dicho ensayo es llevado a cabo bajo la norma La Norma ASTM G40-92 la cual mide la pérdida de masa resultante de la interacción entre partículas o asperezas duras que son forzadas contra una superficie.

3.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el alcance del objetivo del proyecto se plantearon dos etapas, en la primera corresponde a la parte exploratoria orientada en analizar las propiedades mecánicas y tribológicas de una reparación efectuada por el proceso convencional de GTAW utilizando cinco materiales de aporte, y la segunda parte dirigida al estudio del comportamiento en trayectoria de la partícula aplicado por la técnica no convencional de proyección térmica a alta velocidad y observar su adherencia así como sus propiedades tribológicas a fin de encontrar los parámetros que logren una coalescencia entre el material reparador y el sustrato.

3.3 MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Dentro de los métodos estadísticos son conocidos como Taguchi y experimentos factoriales (EF) aquellos en los que se estudian simultáneamente dos o más factores. Para lograr mejorar la aplicación de la técnica de proyección térmica de alta velocidad es necesario tomar en cuenta la influencia de los parámetros de trayectoria de la partícula a depositar así como su tipo y grado, para esta experimentación se utilizó como variables la distancia de trabajo, el flujo de combustible, el flujo de oxígeno, la relación combustible-Oxígeno, velocidad de alimentación del material reparador y el flujo de aire como los parámetros que afectan a la velocidad y temperatura de la partícula en trayectoria.

Estos EF y sus correspondientes cálculos de análisis de varianza (ANOVA), son diseños útiles para llegar a conclusiones simultáneas acerca de dos o más factores. Se usa el término factorial porque las condiciones experimentales incluyen todas las combinaciones posibles de factores.

Para validar el diseño de experimento del tipo taguchi utilizado en la experimentación se procedió a realizar un DOE del tipo factorial Multiniveles.

La secuencia de la realización de las muestras está dada en forma aleatoria, para evitar un sesgo en la experimentación.

CAPÍTULO 4

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL METAL BASE

4.1.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL METAL BASE

El análisis químico de acuerdo a la norma ASTM E-1019, E-1085 se realizó mediante la técnica de espectrometría de rayos X y la determinación de C y S por la técnica de detección y combustión infrarroja, ver tabla 4.1. Se procedió a determinar las propiedades del material base para la selección del material reparador adecuado al uso.

Tabla 4. 1 Composición química del material base

Elemento (% en peso)						
Identificación	C	S	Mo	P	V	Cr
Metal base	1,56	0,017	0,96	0,011	0,84	11,53

En la tabla 4.2 se muestra la composición química para los materiales de aporte empleados en la reparación de herramientales de conformado de acero grado herramienta por método convencional (GTAW) se utilizaron los siguientes materiales de aporte, M2, S7, Weartech 6, Stellite 12, Stellite 6, las características químicas se muestran en la tabla 4.2. El polvo comercial de

gas atomizado Fe-Cr-Mo proporcionado por la empresa (Sulzer Metco Inc.,) fue usado para su estudio. La composición química y el tamaño de la partícula es mostrado en la tabla 4.3.

Tabla 4. 2 Composición química de los materiales de aporte utilizados en la reparación por el método de GTAW.

Especificación	% en peso								
	C	Co	Cr	Fe	Mo	Ni	Si	V	W
M2	0,78 - 1,05	---	3,75 - 4,50	Bal.	4,50 - 5,50	0,3 Max.	0,20 - 0,45	1,75 - 2,20	5,50 - 6,75
S7	0,45 - 0,55	---	3,00 - 3,50	Bal.	1,30 - 1,80	---	0,20 - 1,00	0,20 - 0,30	---
Weartech 6	1,10	Bal.	28,00	3,00 Max.	---	3,00 Max.	1,10	---	4,00
Stellite 12	1,40 - 1,85	Bal.	29,50	2,50	---	3,00 Max.	1,50	---	8,50
Stellite 6	0,35	---	5,00	---	1,50	---	1,00	0,30	1,30

Tabla 4. 3 Especificación del polvo utilizado para la aplicación mediante Proyección térmica de alta velocidad.

Polvo	Composición (% en peso)							Tamaño de la partícula (µm) nominal
	Cu	Cr	Mo	Mn	Si	B	Fe	
Fe-Cr-Mo	3	17	11	0.1	3	3	Bal.	-45 +/- 5,5 µm

El análisis metalográfico de acuerdo a la ASTM E-3, E-407 reveló una microestructura compuesta por una matriz de Martensita revenida con carburos de Cromo y Molibdeno $M_{23}C_6$ dispersos en la matriz. Ver figura 4.1.

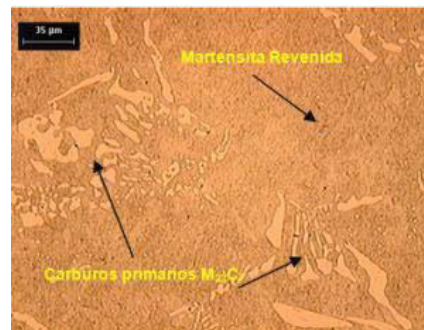


Figura 4. 1 Carburos primarios dispersos en una matriz de martensita revenida. atacada con Picral + HCl 3% 500X

Ensayo de dureza de acuerdo ASTM E-384/99 se realizó en el metal base, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.4.

Tabla 4. 4 Dureza del metal base y su equivalencia de acuerdo a la especificación para un acero grado herramienta para trabajado en frío.

Muestra	Hv500						Promedio (H v500)	Equivalencia (HRC)
Metal base	696	686	684	694	688	670	686	59
Especificación acero grado herramienta	58-64 HRC							

Una vez aplicada la soldadura por el proceso convencional GTAW con los parámetros listados en el capítulo 3 en la tabla 3.1, se procedió a caracterizar las muestras (microscopia óptica, dureza, composición química, desgaste). El análisis metalográfico de acuerdo a la norma ASTM E-3, E-407 reveló una microestructura compuesta por una matriz de Martensita revenida con carburos de Cromo y Molibdeno $M_{23}C_6$ y M_7C_6 dispersos en la matriz del material base, con crecimiento de grano en la dirección $\langle 100 \rangle$ en la zona afectada por el calor y una matriz de granos columnares de solidificación, con precipitación interdendrítica de carburos primarios en la zona de soldadura. Ver figuras 4.2-4.16.

4.1.2 ANÁLISIS METALOGRÁFICO EN SOLDADURAS ASTM E-3/07, E-407/05

M2

Metal Base

El análisis revela una microestructura compuesta por carburos primarios $M_{23}C_6$ dispersos en una matriz de Martensita revenida, Ver figura 4.2.



Figura 4. 2 Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de Martensita revenida. 200X. ataque químico con Picral

Zona Afectada por el Calor

El análisis revela una microestructura compuesta por granos equiaxiales y carburos primarios $M_{23}C_6$ dispersos en una matriz de Martensita revenida con un crecimiento de los granos en la dirección [100], Ver figura 4.3.

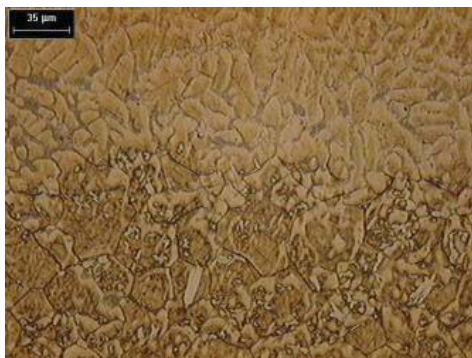


Figura 4. 3 Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de Martensita revenida. 200X. ataque químico con Picral

Soldadura

El análisis revela una microestructura compuesta de una matriz de granos columnares de solidificación, con precipitación interdendrítica de carburos primarios, Ver figura 4.4.



Figura 4. 4 Granos columnares de solidificación, con precipitación interdendrítica de carburos primarios. 200X. ataque químico con Picral

S7***Metal Base***

El análisis revela una microestructura compuesta por carburos primarios $M_{23}C_6$ dispersos en una matriz de Martensita revenida, Ver figura 4.5.

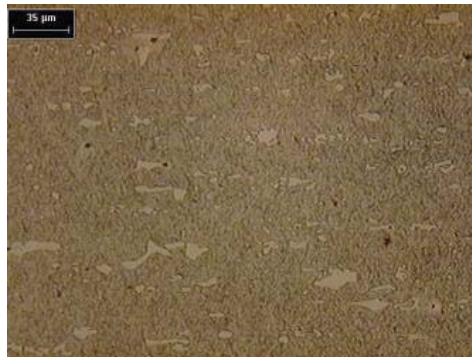


Figura 4. 5 . Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de Martensita revenida. 200X. ataque químico con Picral

Zona Afectada por el Calor

El análisis revela una microestructura compuesta por granos equiaxiales y carburos primarios $M_{23}C_6$ dispersos en una matriz de Martensita revenida con un crecimiento de los granos en la dirección [100], Ver figura 4.6.



Figura 4. 6 Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de Martensita revenida. 100X. ataque químico con Picral

Soldadura

El análisis revela una microestructura compuesta de una matriz de granos columnares de solidificación, con precipitación interdendrítica de carburos primarios, Ver figura 4.7.



Figura 4. 7 Granos columnares de solidificación, con precipitación interdendrítica de carburos primarios. 200X. ataque químico con Picral

Weartech 6

Metal Base

El análisis revela una microestructura compuesta por carburos primarios $M_{23}C_6$ dispersos en una matriz de Martensita revenida, Ver figura 4.8.



Figura 4. 8 Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de Martensita revenida. 500X. ataque químico con Picral

Zona Afectada por el Calor

El análisis revela una microestructura compuesta por granos equiaxiales y carburos primarios $M_{23}C_6$ dispersos en una matriz de Martensita revenida con un crecimiento de los granos en la dirección [100], Ver figura 4.9.



Figura 4. 9 Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de Martensita revenida. 100X. ataque químico con Picral

Soldadura

El análisis revela una microestructura compuesta de una matriz de granos columnares de solidificación, Ver figura 4.10.



Figura 4. 10 Granos columnares de solidificación. 200X. ataque químico con Picral

Stellite 6

Metal Base

El análisis revela una microestructura compuesta por carburos primarios $M_{23}C_6$ dispersos en una matriz de Martensita revenida, Ver figura 4.11.

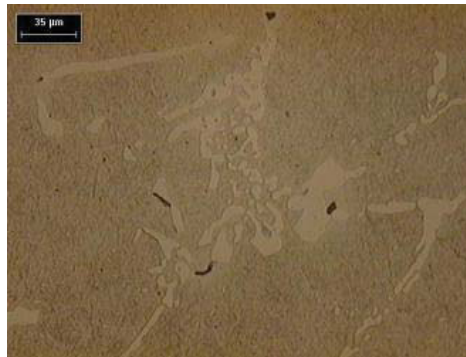


Figura 4. 11 Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de Martensita revenida. 200X. ataque químico con Picral

Zona Afectada por el Calor

El análisis revela una microestructura compuesta por granos equiaxiales y carburos primarios $M_{23}C_6$ dispersos en una matriz de Martensita revenida con un crecimiento de los granos en la dirección [100], Ver figura 4.12.



Figura 4. 12 Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de Martensita revenida. 100X. ataque químico con Picral

Soldadura

El análisis revela una microestructura compuesta de una matriz de granos columnares de solidificación. Ver figura 4.13.

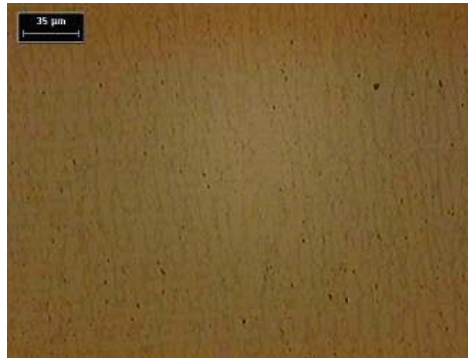


Figura 4. 13 Granos columnares de solidificación. 200X. ataque químico con Picral

Stellite 12

Metal Base

El análisis revela una microestructura compuesta por carburos primarios $M_{23}C_6$ dispersos en una matriz de Martensita revenida, Ver figura 4.14.



Figura 4. 14 Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de Martensita revenida. 500X. ataque químico con Picral

Zona Afectada por el Calor

El análisis revela una microestructura compuesta por granos equiaxiales y carburos primarios $M_{23}C_6$ dispersos en una matriz de Martensita revenida con un crecimiento de los granos en la dirección [100], Ver figura 4.15.



Figura 4. 15 Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de Martensita revenida. 200X. ataque químico con Picral

Soldadura

El análisis revela una microestructura compuesta de una matriz de granos columnares de solidificación, Ver figura 4.16.



Figura 4. 16 Granos columnares de solidificación. 200X. ataque químico con Picral

Adicionalmente se realizó una prueba con una muestra de soldada por el proceso de oxígas a fin de obtener una referencia del material por medio de un proceso alterno encontrándose que el material base presenta un tratamiento térmico de recosido no siendo este apto para el estudio debido a que no presenta una microestructura martensítica por lo tanto sus propiedades son menores a las mostradas en las figuras 4.2 a 4.16

Oxi-Gas

Metal Base

El análisis revela una microestructura compuesta por granos equiaxiales y carburos primarios $M_{23}C_6$ dispersos en una matriz sólida rica en cromo, Ver figura 4.17.



Figura 4. 17 Granos equiaxiales y carburos primarios M₂₃C₆. 200X. ataque químico con Picral

Zona Afectada por el Calor

El análisis revela una microestructura compuesta por granos equiaxiales y carburos primarios M₂₃C₆ dispersos en una matriz de sólida rica en Cromo, Ver figura 4.18.



Figura 4. 18 Granos equiaxiales y carburos primarios M₂₃C₆. 200X. ataque químico con Picral

Soldadura

El análisis revela una microestructura compuesta de una matriz de granos columnares de solidificación, Ver figura 4.19.



Figura 4. 19 Granos columnares de solidificación. 100X. ataque químico con Beraha's

4.1.3 ENSAYO DE MICRODUREZA: ASTM E384/08.

Se realizó un total de cuatro identaciones a la muestra, utilizando un indentador piramidal de diamante con un ángulo de 136° , con una carga de 500 grf, obteniéndose los siguientes resultados mostrados en la tabla 4.5. Se puede apreciar que el material base posee un promedio de dureza de alrededor de 60 HRC lo cual es congruente con su microestructura y proceso de fabricación, la muestra que presenta una mayor dureza en la región de soldadura es el espécimen con el aporte de Stellite 12, el cual de acuerdo a la química mostrada en la tabla 4.2 tiende a formar carburos dispersos en la matriz, como lo son: los carburos de cromo $M_{23}C_6$ y M_6C_7 los cuales son termodinámicamente estables, lo cual se observó en las figuras representativas de soldadura, es más evidente en la figura 4.14 correspondiente a la muestra de Stellite 12 también se pueden observar carburos secundarios dispersos en la matriz. La muestra Wear tech 6 fue la que presentó una menor dureza en la región de soldadura, aunque en la figura 4.8 se evidencia la presencia de carburos de cromo, la matriz presenta una martensita fina, a diferencia del resto de los especímenes, el tamaño de las agujas es menor que el resto del rango explorado.

Tabla 4. 5 Ensayos de dureza realizados a las muestras recubiertas bajo la técnica de GTAW

Identificación	Zona	Hv ₅₀₀				Promedio Hv ₅₀₀	Equivalencia HRC
M2	Metal base	664	763	761	767	738	62
	ZAC	592	628	535	594	587	54
	Soldadura	403	410	427	394	408	42
S7	Metal base	733	799	756	719	751	63
	ZAC	481	426	398	390	423	43
	Soldadura	560	523	497	540	530	52
Weartech 6	Metal base	721	661	750	713	711	61
	ZAC	388	454	485	461	447	46
	Soldadura	405	385	428	397	403	42
Stellite 6	Metal base	715	650	718	657	685	59
	ZAC	435	355	378	404	393	40
	Soldadura	403	388	408	400	399	42
Stellite 12	Metal base	625	673	723	729	687	59
	ZAC	394	352	421	340	376	39
	Soldadura	596	597	556	606	588	54
Oxi-Gas	Metal base	422	456	437	468	445	44
	ZAC	398	386	381	392	389	40
	Soldadura	409	423	419	413	416	40

Una vez aplicada la soldadura por el proceso convencional GTAW con los parámetros listados en la tabla 2, se procedió a caracterizar las muestras (microscopia óptica, dureza, químico, desgaste). El análisis metalográfico de acuerdo a la norma ASTM E-3, E-407 reveló una microestructura compuesta por una matriz de Martensita revenida con carburos de Cromo y Molibdeno M23C7 y M7C6 dispersos en la matriz del material base, con crecimiento de grano en la dirección <100> en la zona afectada por el calor y una matriz de granos columnares de solidificación, con precipitación interdendrítica de carburos primarios en la zona de soldadura, Ver Figura 4.20.

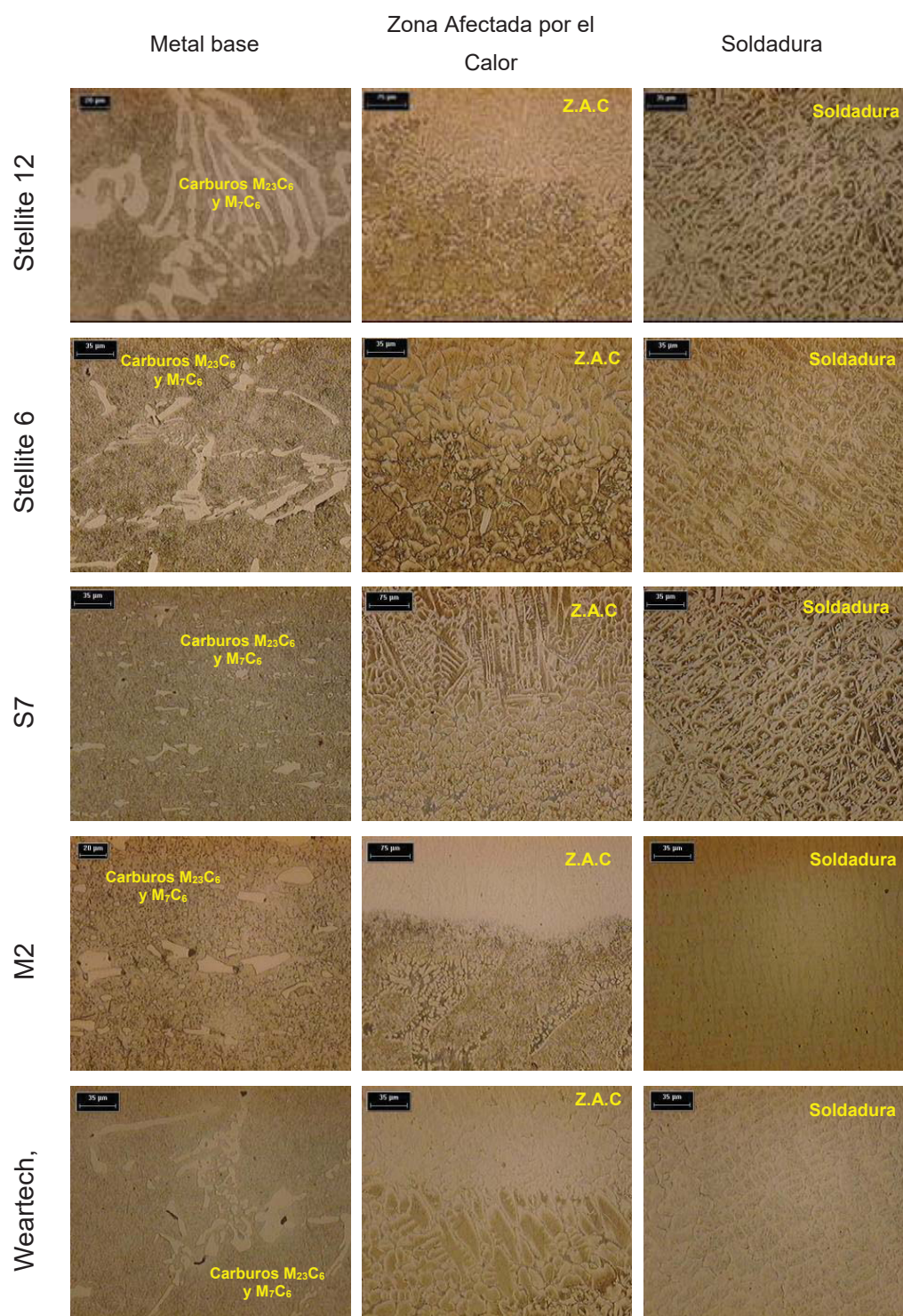


Figura 4.20. Martensita revenida con carburos de Cromo y Molibdeno
 $M_{23}C_7$ y M_7C_6 dispersos en la matriz

Posteriormente se realizó el ensayo de resistencia al desgaste bajo la técnica de Pin-Ball-Disc a las muestras soldadas por la técnica de GTAW con los diversos materiales de aporte descritos en la Tabla 4 y ensayados con los parámetros descritos en la Tabla 6, esto con el fin de evidenciar que material de aporte provee mejores características para la aplicación de conformado en frío, tomando el coeficiente de fricción como medida para verificar la resistencia al desgaste ya que se tiene conocimiento que al incrementar el coeficiente de fricción el desgaste es mayor. En la Figura 4.21 se muestra la variación del coeficiente de fricción con respecto al tiempo para los diferentes recubrimientos y procesos. Se observa que el recubrimiento realizado mediante HVOF es el que presenta la menor resistencia al desgaste que el TIG esto se debe a que en los procesos el tipo de anclaje difiere mientras que uno es mecánico el otro es por liga metalúrgica, respectivamente. De los recubrimientos depositados por TIG el que presenta mejor resistencia a la abrasión es el Stellite 12.

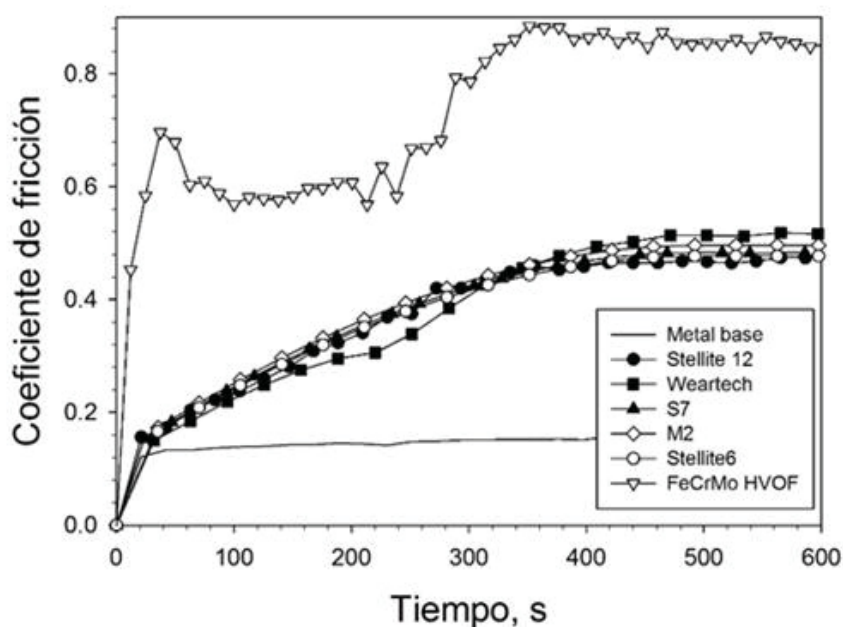


Figura 4.21.- Resultados de resistencia al desgaste para todas las muestras estudiadas.

Una vez ajustadas las condiciones de aplicación del HVOF, en la presente etapa se efectuaron 18 pruebas variando los diferentes parámetros del metalizado por proyección como se muestra en la Tabla 5. En la Figura 4.22

se muestra los resultados obtenidos de los valores promedio de adherencia del diseño de experimentos aplicado para el proceso HVOF con respecto a la relación Propileno-oxígeno (c/o) y distancia, se aprecia que el valor más alto de adherencia se consigue para las relaciones de c/o más bajas y las distancias más cortas de aplicación, es decir a 200 mm con una relación de combustible/oxígeno de 0.30. Aunque se observa que se pueden obtener recubrimientos con relaciones c/o mayores con adherencia similares independientemente de la distancia de aplicación en el rango examinado.

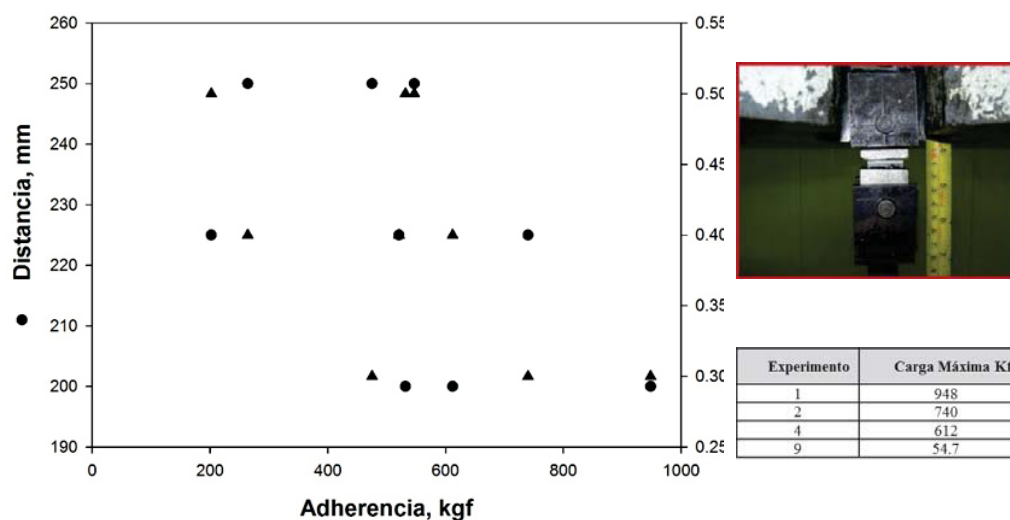


Figura 4.22.- Resultados de adherencia del diseño de experimentos aplicado.

En la Figura 4.23 se muestra la variación de la dureza con respecto al número de indentación comparando dos de los recubrimientos, para diferentes relaciones de c/o manteniendo constante la distancia de trabajo. Se observa que cuando se tiene una relación c/o mayor la dureza del recubrimiento incrementa.

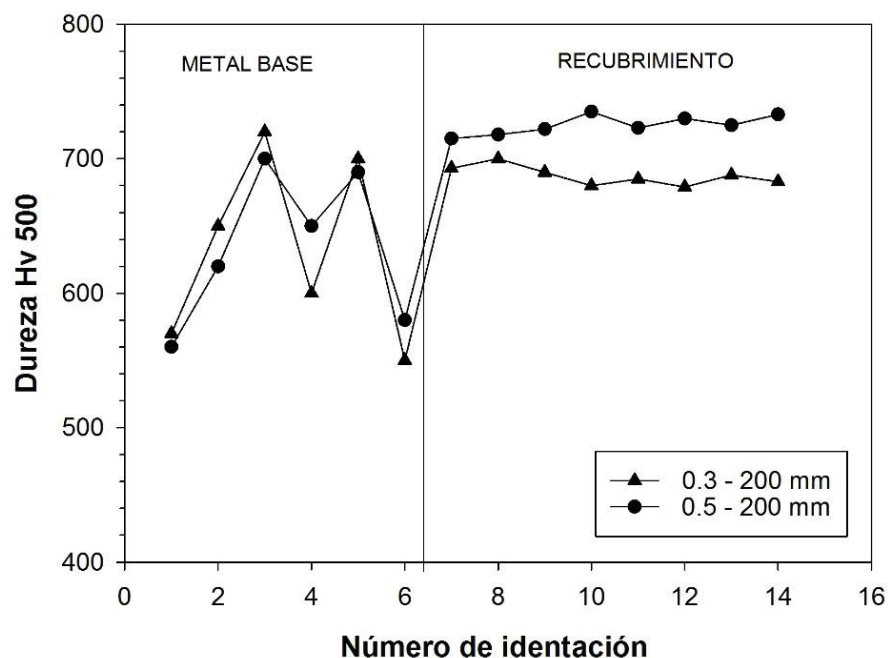


Figura 4.23.- Relación de dureza para dos recubrimientos 0.3 c/o – 200 mm y 0.5 c/o -200 mm.

En la Figura 4.28 se muestra imágenes obtenidas por microscopia electrónica de barrido de la zona transversal de la muestra a) 0.3 c/o – 200 mm y b) 0.5 c/o -200 mm. Se observa que la muestra a) presenta una unión mecánica en la interface sin presencia de discontinuidades, sin embargo, la muestra b) presenta una discontinuidad notoria en la interfase lo cual perjudica de forma detrimental la adherencia del recubrimiento debido a la no coalescencia con el sustrato. Cuando las relaciones de Propileno/Oxígeno (c/o) son altas, la relación estequiometrica de combustión se aleja más debido a un mayor contenido de Oxígeno, teniendo especies oxidadas en su superficie, lo que promueve que el recubrimiento no logre un anclaje suficiente en la superficie del material que será reparado por la técnica de HVOF, lo cual afecta fuertemente su adherencia.

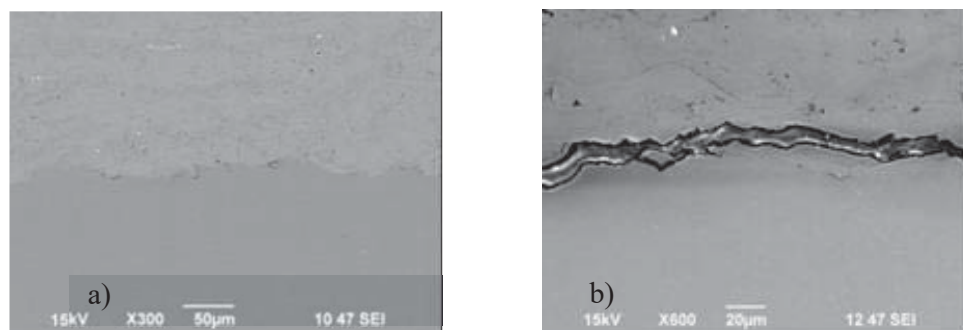
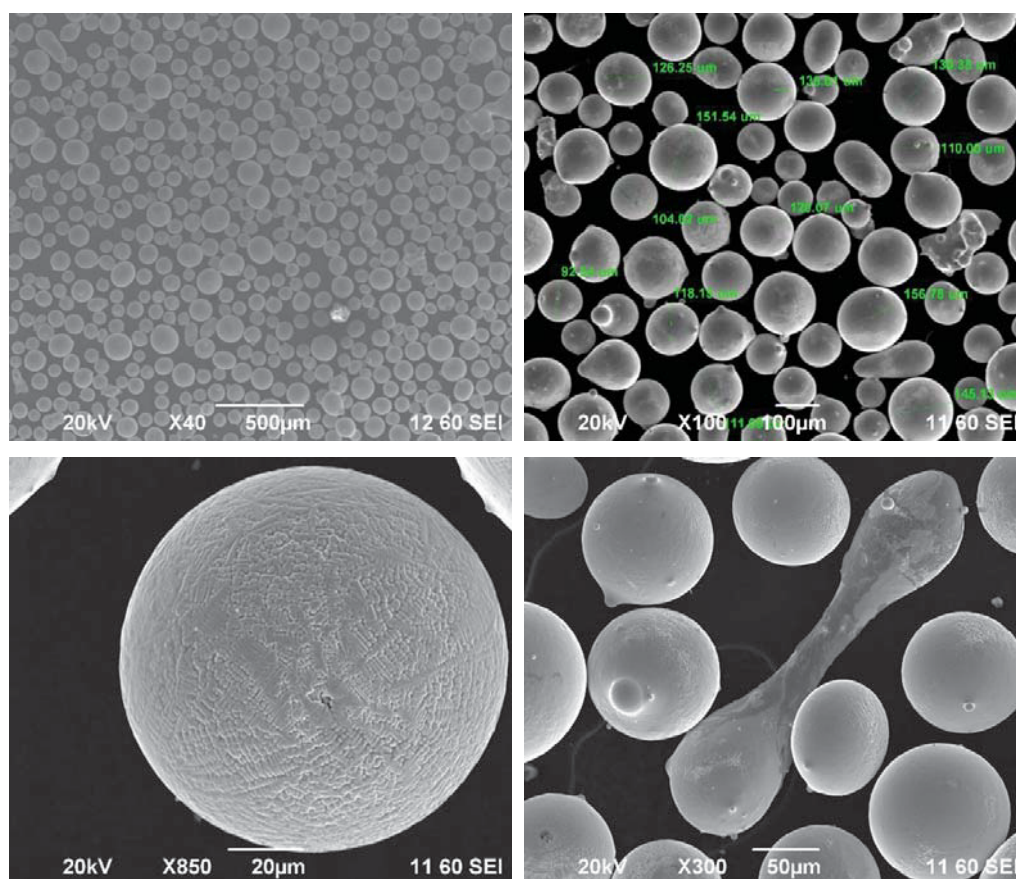


Figura 4.28 Imágenes obtenidas por microscopia electrónica de barrido de la zona transversal de las muestras a) 0.3 c/o – 200 mm y b) 0.5 c/o -200 mm.

Asimismo, se caracterizó el material de aporte con el fin de verificar la apariencia del mismo antes y después del depósito. Ver figura 4.29



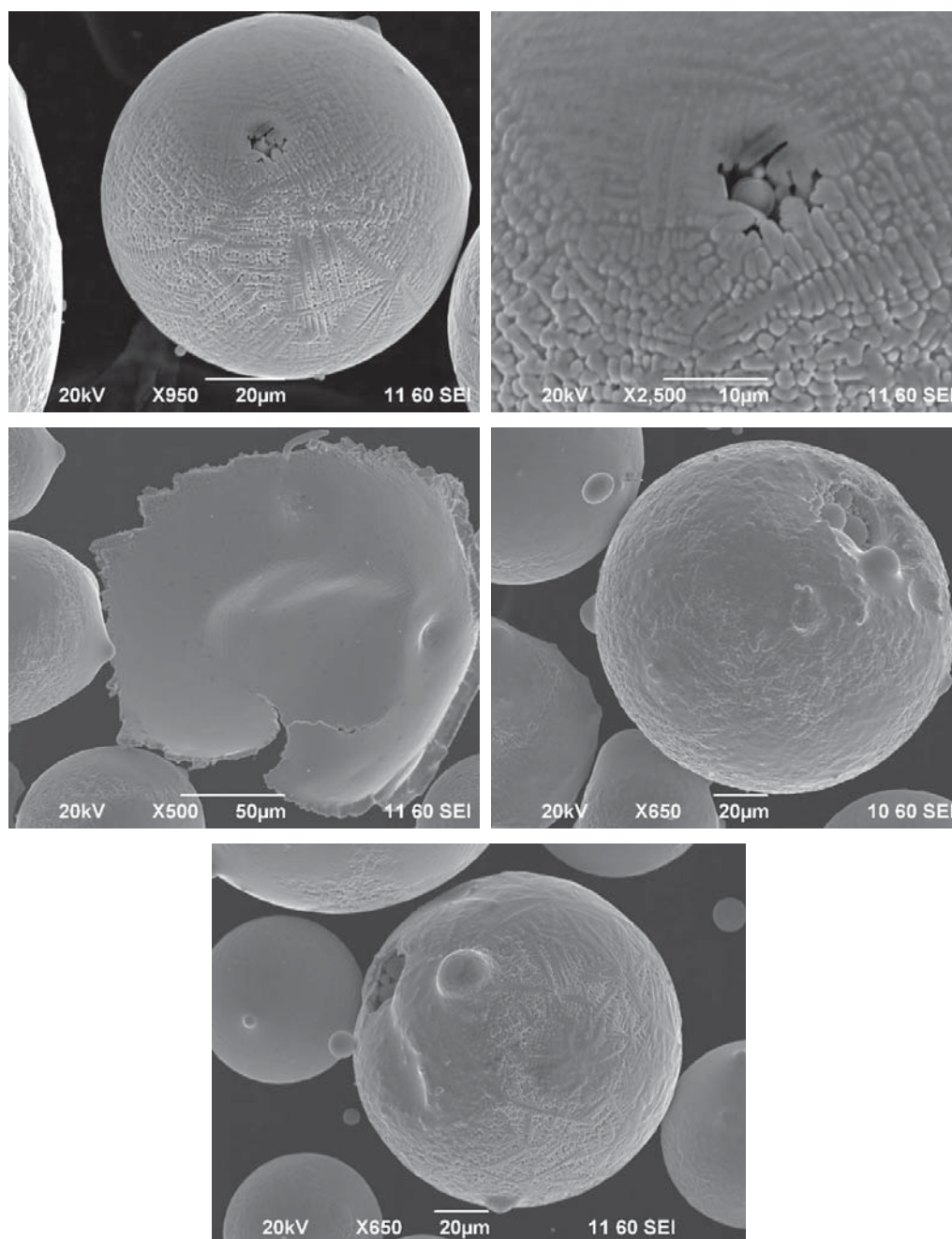


Figura 4.29. análisis del tamaño y distribución de la partícula del proceso de proyección térmica de alta velocidad.

Posteriormente se procedió a caracterizar una matriz de conformado con una pérdida de espesor del material, el cual fue preparado para su aplicación por la técnica de proyección térmica de alta velocidad. La figura 4.30, corresponde a un mapeo del corte transversal a la zona de falla en la que se evidencia claramente la pérdida del espesor de diámetro por la disolución del material. La cual posteriormente se someterá a una reparación mediante la técnica de HVOF. Mediante un acercamiento en la zona del recuadro amarillo se logra evidenciar una gran cantidad de productos de corrosión alrededor de todo el contorno de la picadura. Ver figura 4.31, la utilización de sustratos como el acero grado herramienta para trabajado en frío, han sido reparadas usando también un polvo de composición química semejante al acero correspondiente (Fe-Cr-Mo). Sus características químicas fueron mostradas en el capítulo tres en la tabla 3.2.

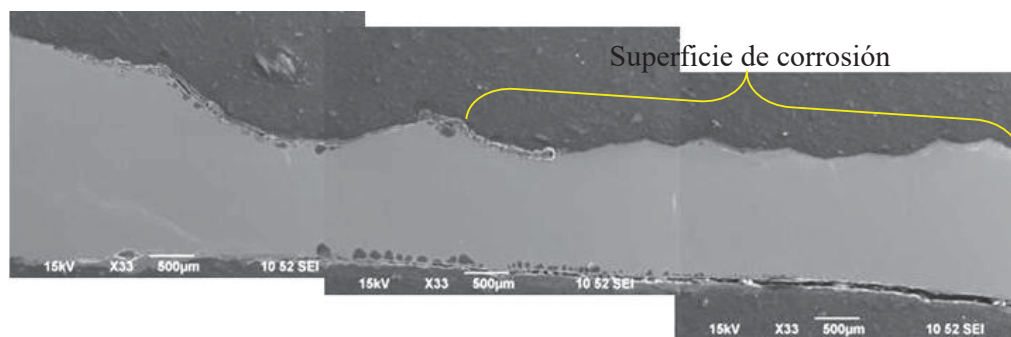


Figura 4. 30 Aspecto superficial de la muestra antes de ser recubierta mediante la técnica de HVOF

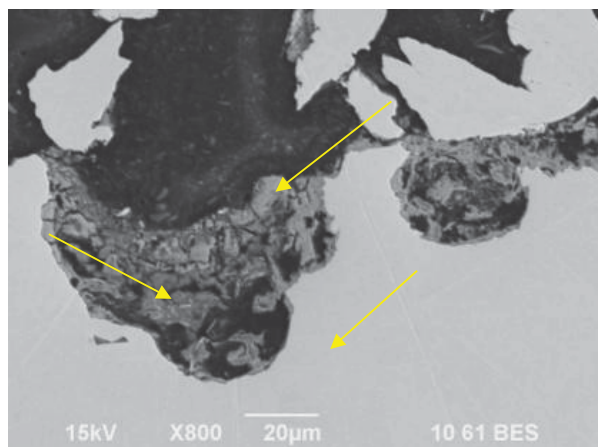


Figura 4. 31 Vista cercana a superficie de frente de avance de cavidad, donde se nota claramente la disolución de material en forma de pequeñas picaduras (flechas amarillas), 800X (MEB).

En la figura 4.32a, se muestra un acercamiento a la zona de defecto “picadura” y la figura 4.32b, corresponde a un microanálisis realizado sobre los productos de corrosión antes descritos, identificándose como principales especies químicas al Hierro (Fe), Cloro (Cl) y Oxígeno (O), El oro presente corresponde al recubrimiento depositado para su inspección en el MEB.

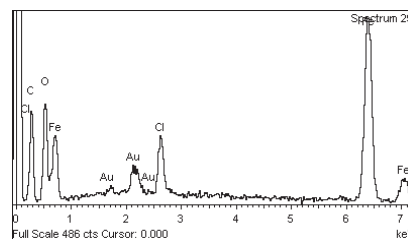
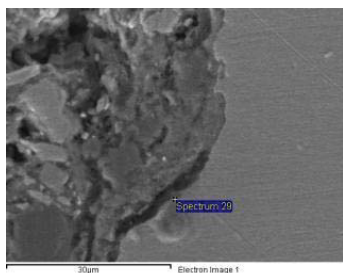


Figura 4.32a. Vistas cercanas del zona con productos de corrosión

Figura 4.32b. Espectro del microanálisis semicualitativo realizado sobre los productos de corrosión.

Una vez ajustadas las condiciones de aplicación del HVOF, en la presente etapa se efectuaron 9 pruebas variando los diferentes parámetros de soldadura por proyección como se muestra en la tabla 3.3, en la presente investigación se evaluó el efecto de la distancia con respecto a la unión del depósito en el sustrato y la adherencia del mismo, así como la cantidad de óxido presente en la interfase del recubrimiento y el sustrato. En la figura 4.33, muestra la adherencia del depósito a una distancia de 200 mm con una relación de combustible/oxígeno de 0,30 encontrándose una buena

deposición del material reparador en el sustrato de acero grado herramienta para trabajado en frío. Ver tabla 4.8, encontrando una dureza en el depósito de 579 Hv como se muestra en la tabla 4.9, en la figura 4.34, se observa que existe una pequeña cantidad de porosidad en el corte transversal del depósito lo cual es congruente con los parámetros utilizados por lo que la adhesión del material reparador al sustrato se puede considerar buena debido a que no existe una cantidad de óxidos considerables que puedan actuar como concentradores de esfuerzo y debiliten la unión.

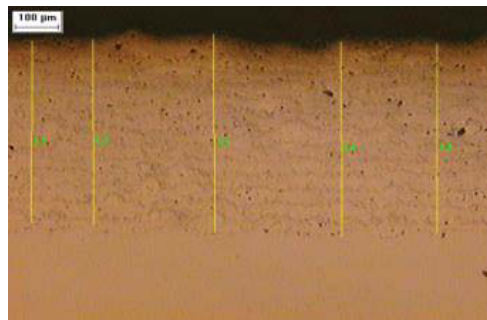


Figura 4. 33 Aspecto superficial del recubrimiento. 50X

Tabla 4. 6 Espesor del depósito en el sustrato.

Prueba (μm)					Promedio (μm)
506	517	554	543	528	529,6

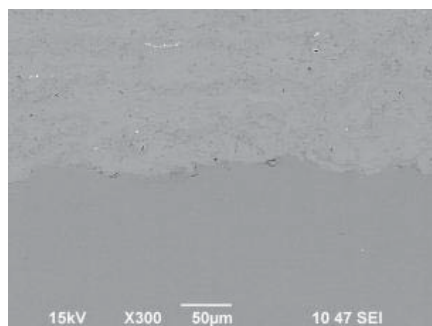
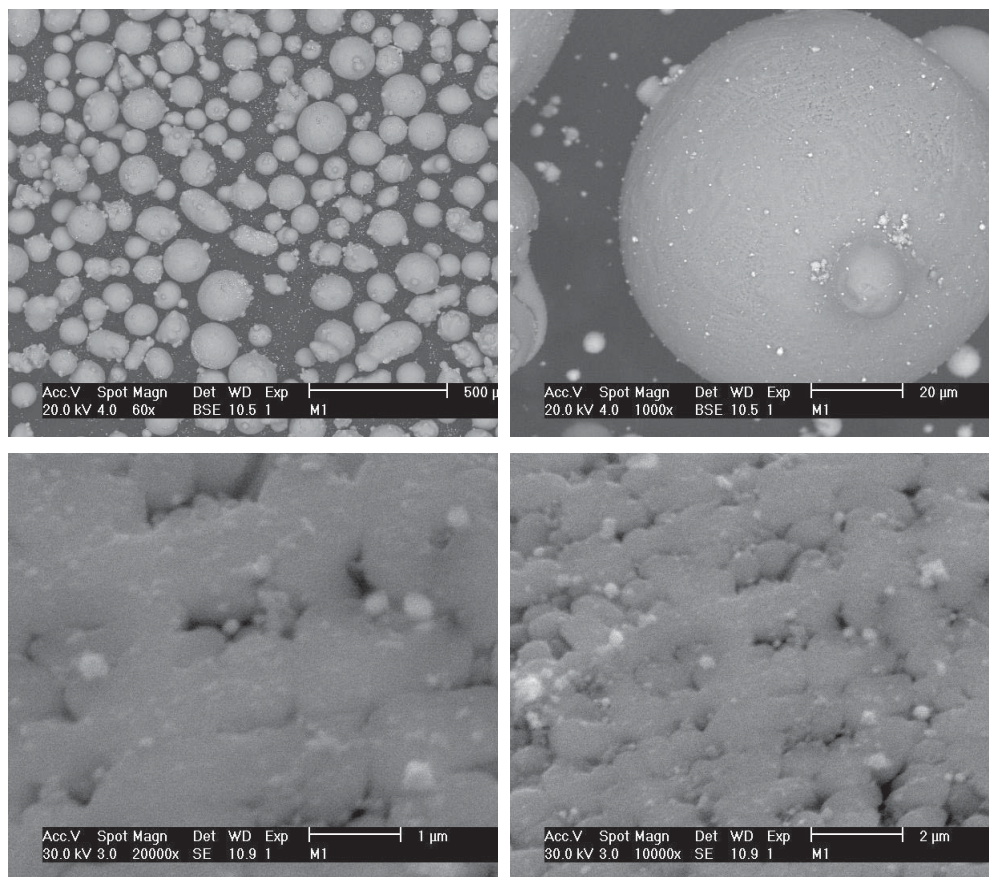
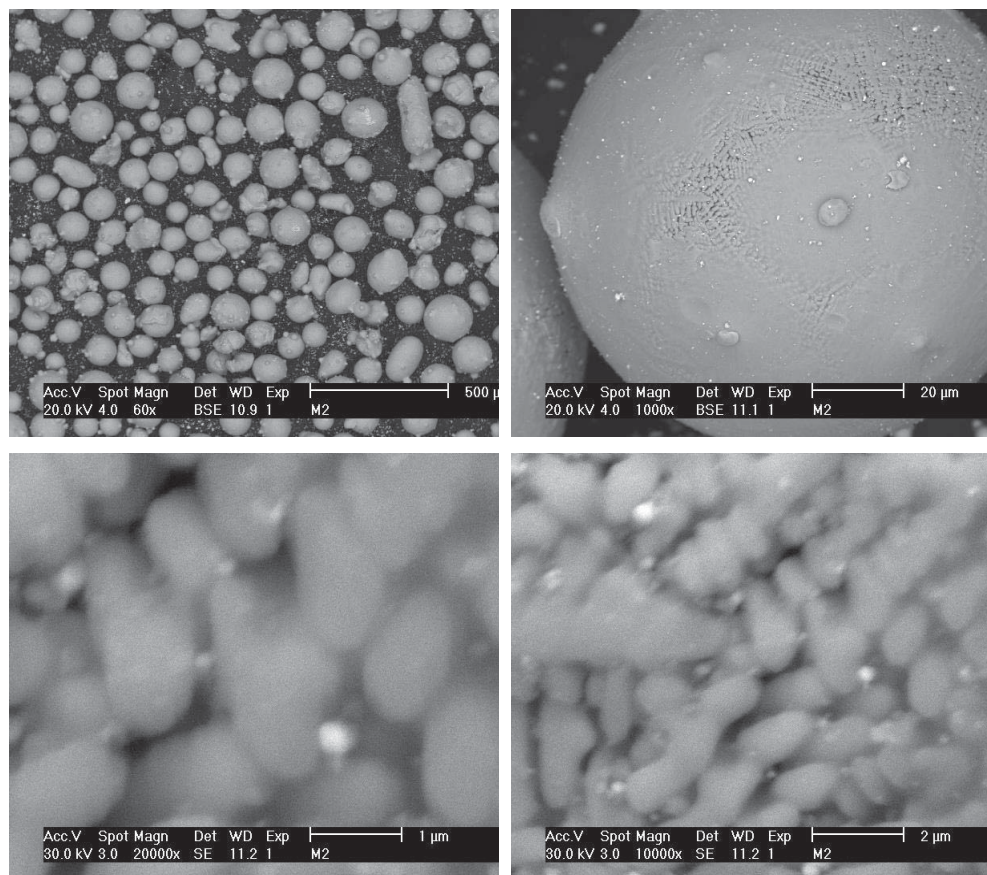


Figura 4. 20 Microscopia electrónica de barrido (MEB), porosidad del depósito.

A continuación, se muestra un acercamiento de la zona de revestimiento.





En la figura 4.35, se observa la distribución de dureza del sustrato y el material reparador encontrándose que cumple para la especificación de un acero grado herramienta para trabajado en frío.

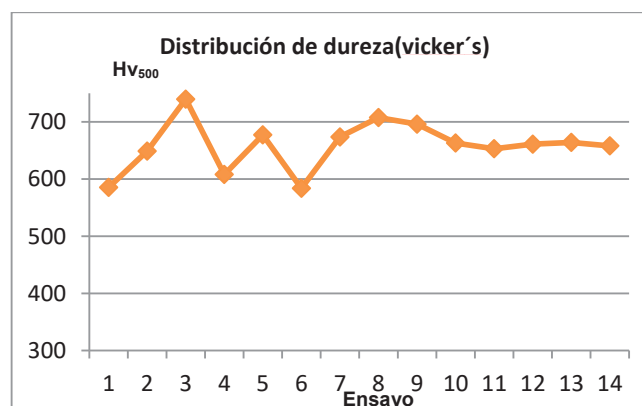


Figura 4. 21, Distribución de dureza Hv500 en el revestimiento del sustrato de acero grado herramienta para trabajado en frío

En la figura 4.37, se muestra la adherencia del depósito a una distancia de 250 mm con una relación de combustible/oxígeno de 0,50 encontrándose una densidad de recubrimiento mayor que en caso anterior lo cual genera una deposición del material reparador. Ver tabla 4.9. Encontrando una dureza en el depósito de 753 Hv como se muestra en la figura 4.38, en la figura 4.39, se observa que existe una gran cantidad de porosidad en el corte transversal del depósito lo cual es congruente con los parámetros utilizados por lo que la adhesión del material reparador al sustrato es deficiente debido a la formación de una capa de óxido en la interfase del material base y el material reparador, lo cual genera una zona de desprendimiento de los materiales haciendo susceptible a daño por corrosión.

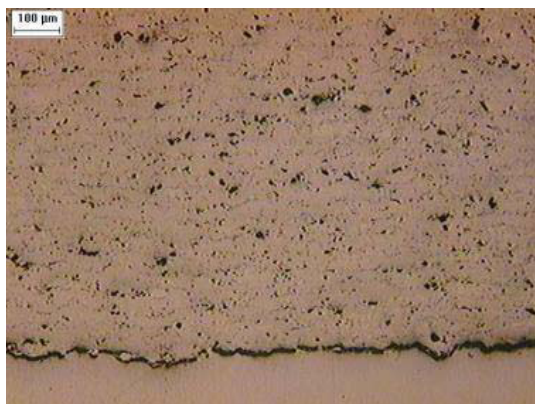


Figura 4. 22 Aspecto superficial del recubrimiento.

50X

Tabla 4. 7 Espesor de recubrimiento depositado en sustrato

Lecturas (μm)					Promedio (μm)
739	743	761	764	758	753

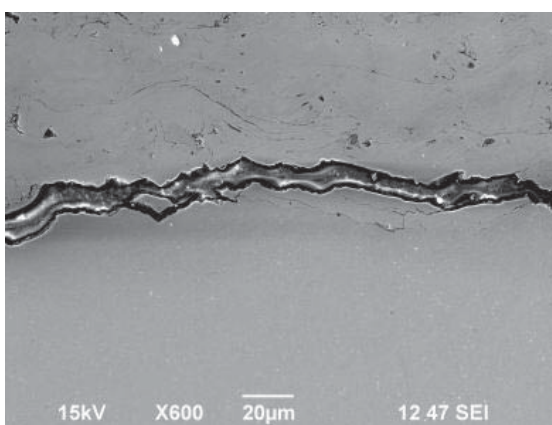


Figura 4. 23 Microscopia electrónica de barrido, porosidad del deposito

4.1.6 ENSAYO DE ADHERENCIA ASTM C 297/04 Y ASTM D 4541/02

Una vez caracterizadas todas las muestras se procedió a realizar la prueba de adherencia bajo la norma ASTM C 297/C 297M – 04 y bajo la norma ASTM D 4541 – 02. El área de selección para las pruebas de adherencia se seleccionó de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM D-4541/02 a temperatura controlada de 25°C +/- 5°C. El área de prueba seleccionada fue una superficie plana lo suficientemente grande para la sujeción del adhesivo con el material depositado. Una vez limpias las superficies de una manera que no afecten la integridad del revestimiento y sin dejar residuos se procede a colocar la resina en toda la superficie a analizar que en este caso fue la probeta cuadrada de 2.54cm. Una vez aplicada la resina se deja un tiempo de curado de 1 hora como lo establece la norma ASTM C297/04, a una presión constante mediante la ayuda de mordazas las cuales funcionan como sujeción mecánica para asegurar que no exista contacto entre el aire y la resina en la zona de ensayo, permitiendo así que el ensayo se lleve a cabo de manera correcta. Cabe señalar que las mediciones cerca de un borde pueden no ser representativas de la capa en su conjunto. En la tabla 4.40 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de adherencia realizadas a las 9 muestras del diseño de experimentos establecido en la tabla 3.3.

Tabla 4. 8 Resultados del ensayo de adherencia realizado sobre las 9 muestras recubiertas bajo la técnica de HVOF.

Identificación	Lado 1 mm	Lado 2 mm	Área Nominal mm ²	Carga Máxima kgf
MUESTRA 1	25.40	25.40	645.16	948
MUESTRA 2	25.40	25.40	645.16	740
MUESTRA 3	25.40	25.40	645.16	475
MUESTRA 4	25.40	25.40	645.16	612
MUESTRA 5	25.40	25.40	645.16	521
MUESTRA 6	25.40	25.40	645.16	264
MUESTRA 7	25.40	25.40	645.16	532

MUESTRA 8	25.40	25.40	645.16	202
MUESTRA 9	25.40	25.40	645.16	54.7

En las figuras 4.41 a 4.49, se muestran las gráficas de resistencia a la adherencia realizadas a las 9 muestras en donde se observa que la muestra que presenta una mayor resistencia fue la contiene una distancia de 200 mm con una relación de combustible/oxígeno de 0,30 encontrándose 948 Kgf de adherencia del material reparador en el sustrato de acero grado herramienta para trabajado en frío lo cual cumple con los criterios de aceptación del recubrimiento, mientras que la muestra que contiene una distancia de 250 mm con una relación de combustible/oxígeno de 0,50 presento 54,7 Kgf desprendiéndose el recubrimiento debido a que no existió una coalescencia entre el sustrato y el material reparador, este se evidencia también en la 4.40 no cumpliendo con los criterios de aceptación del recubrimiento.

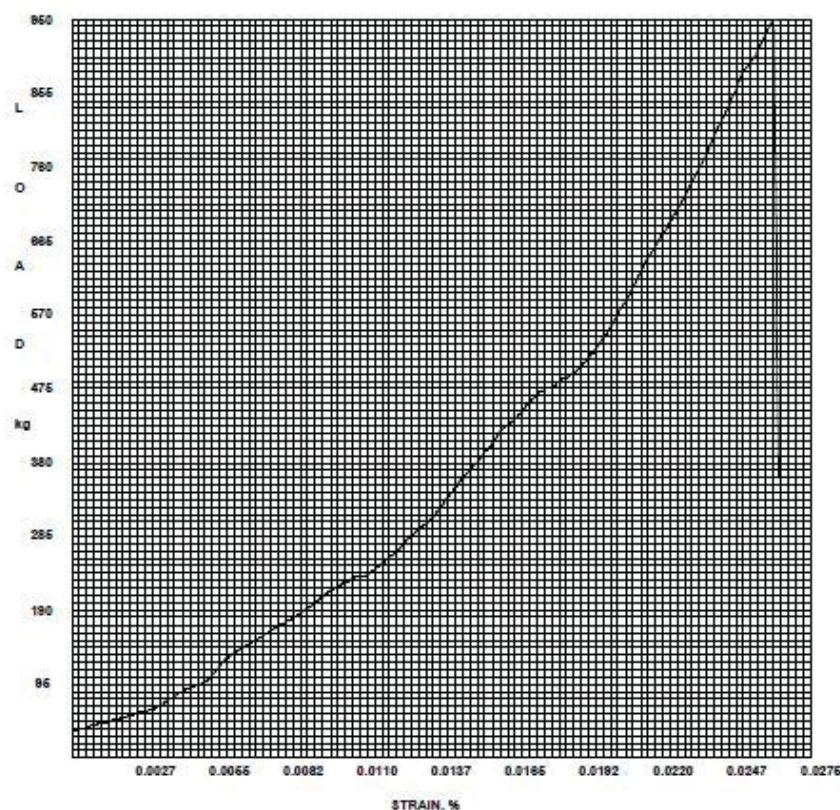


Figura 4. 39 Ensayo de adherencia de la muestra 1 (200mm de distancia con una relación combustible oxígeno de 0,30)

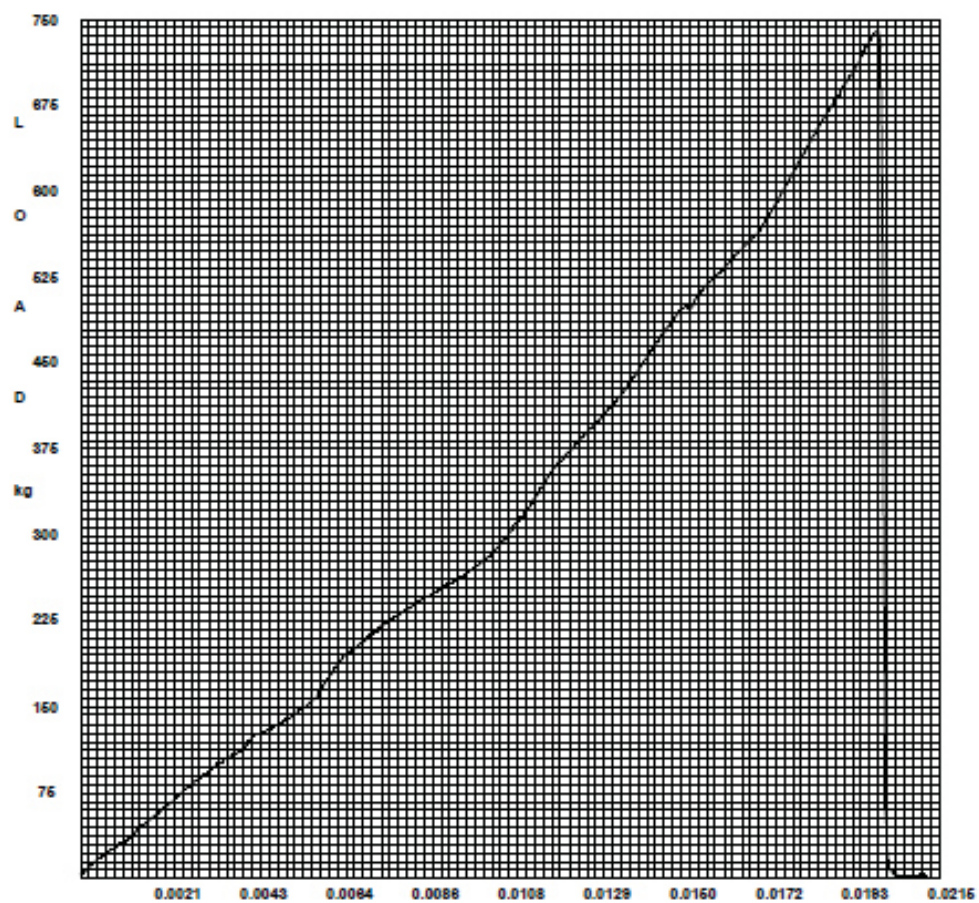


Figura 4. 40 Ensayo de adherencia de la muestra 2 (225mm de distancia con una relación combustible oxígeno de 0,30)

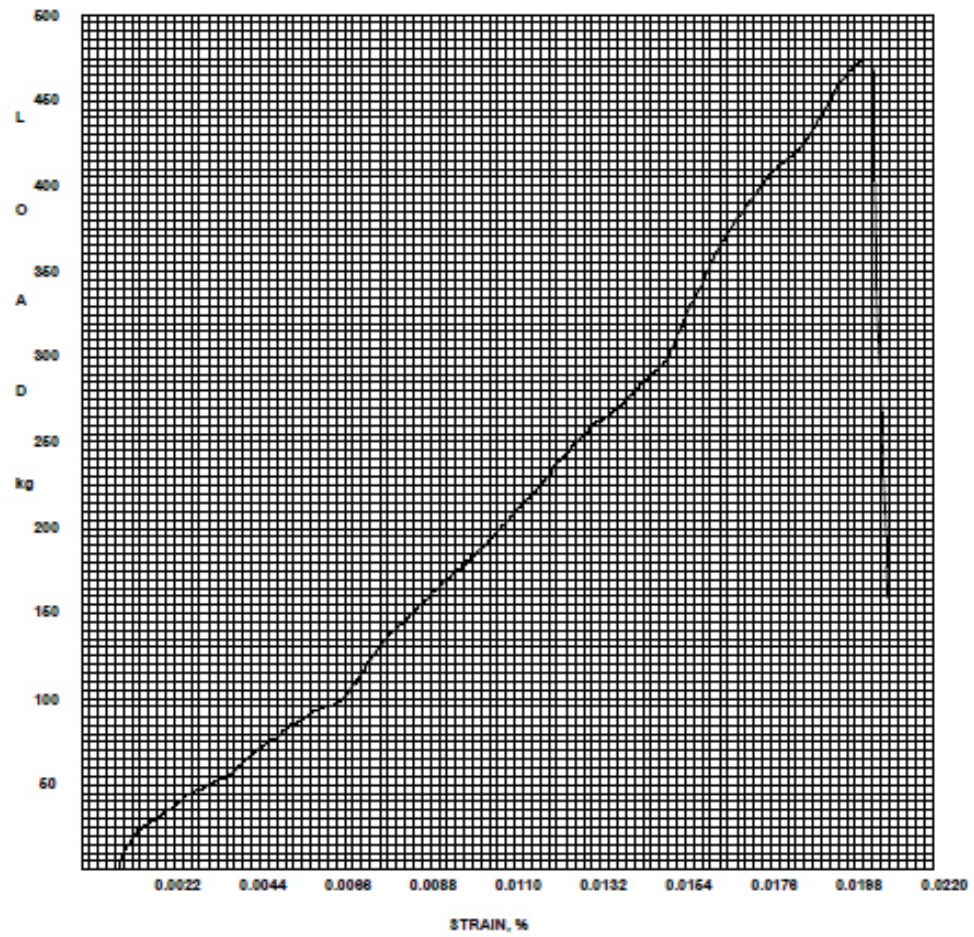


Figura 4. 41 Ensayo de adherencia de la muestra 3 (250mm de distancia con una relación combustible oxígeno de 0,30)

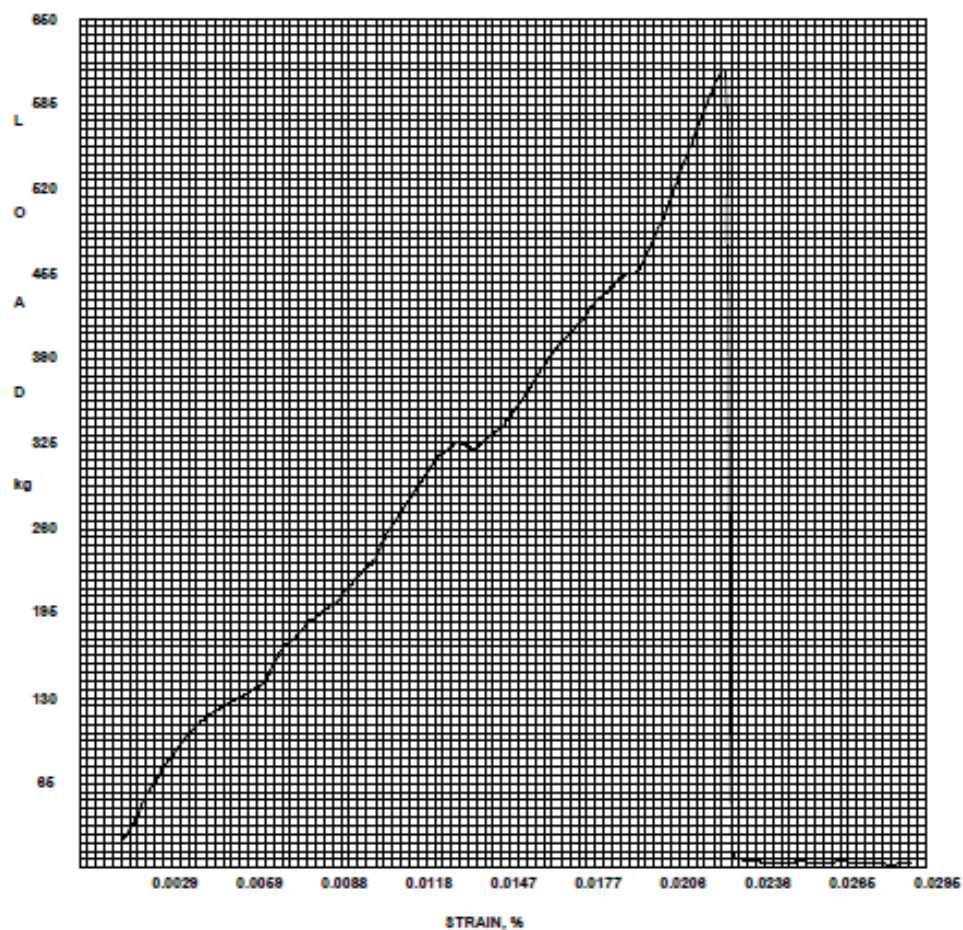


Figura 4. 42 Ensayo de adherencia de la muestra 4 (200mm de distancia con una relación combustible oxígeno de 0,40)

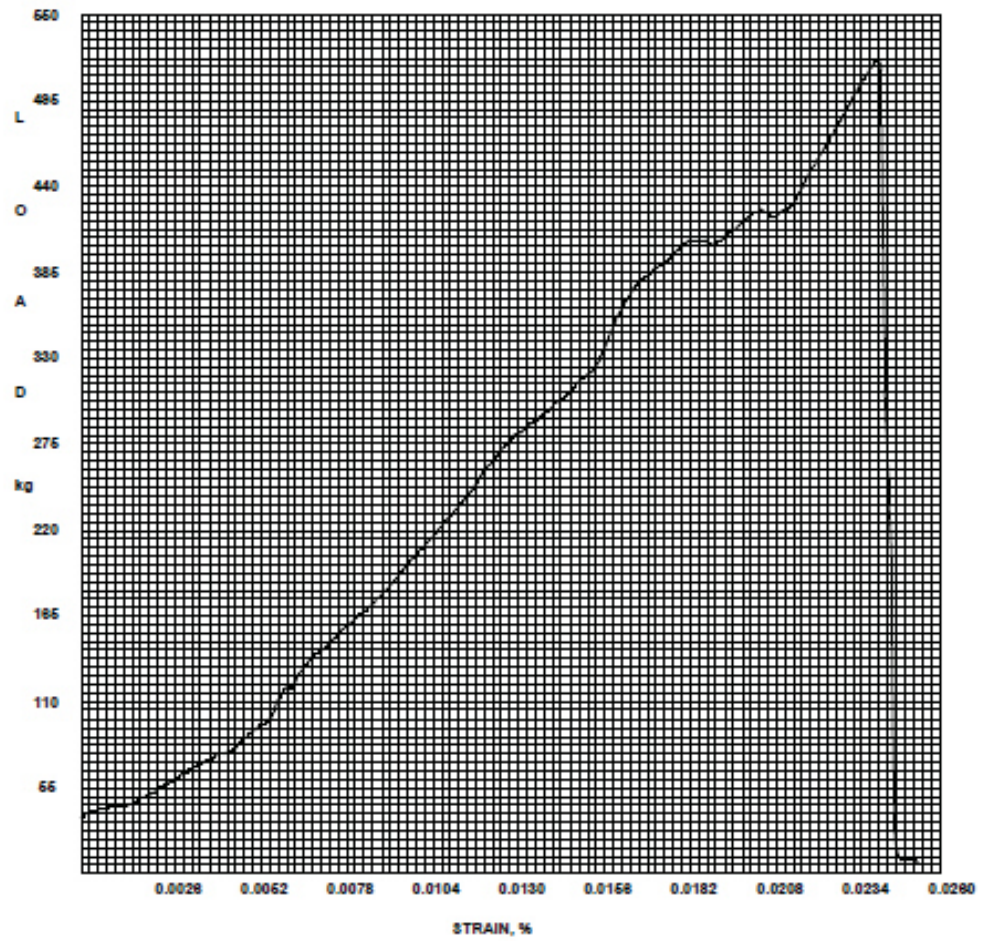


Figura 4. 43 Ensayo de adherencia de la muestra 5 (225mm de distancia con una relación combustible oxígeno de 0,40)

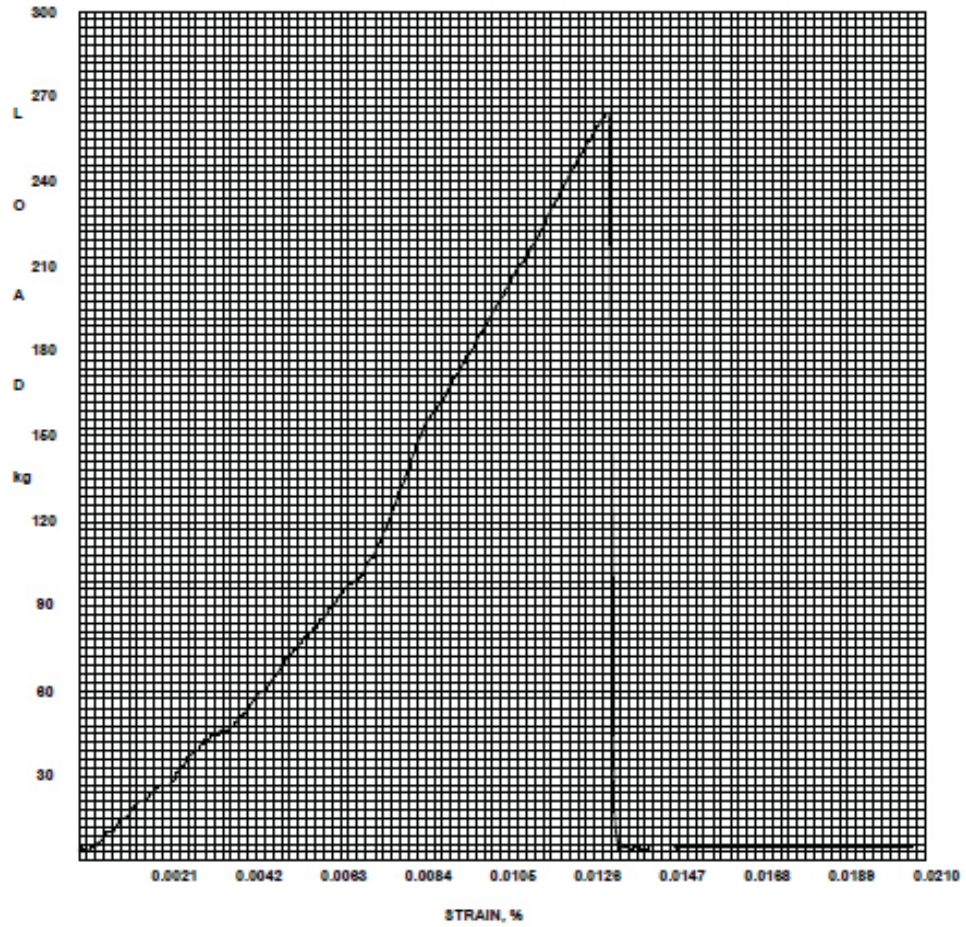


Figura 4. 44 Ensayo de adherencia de la muestra 6 (250mm de distancia con una relación combustible oxígeno de 0,40)

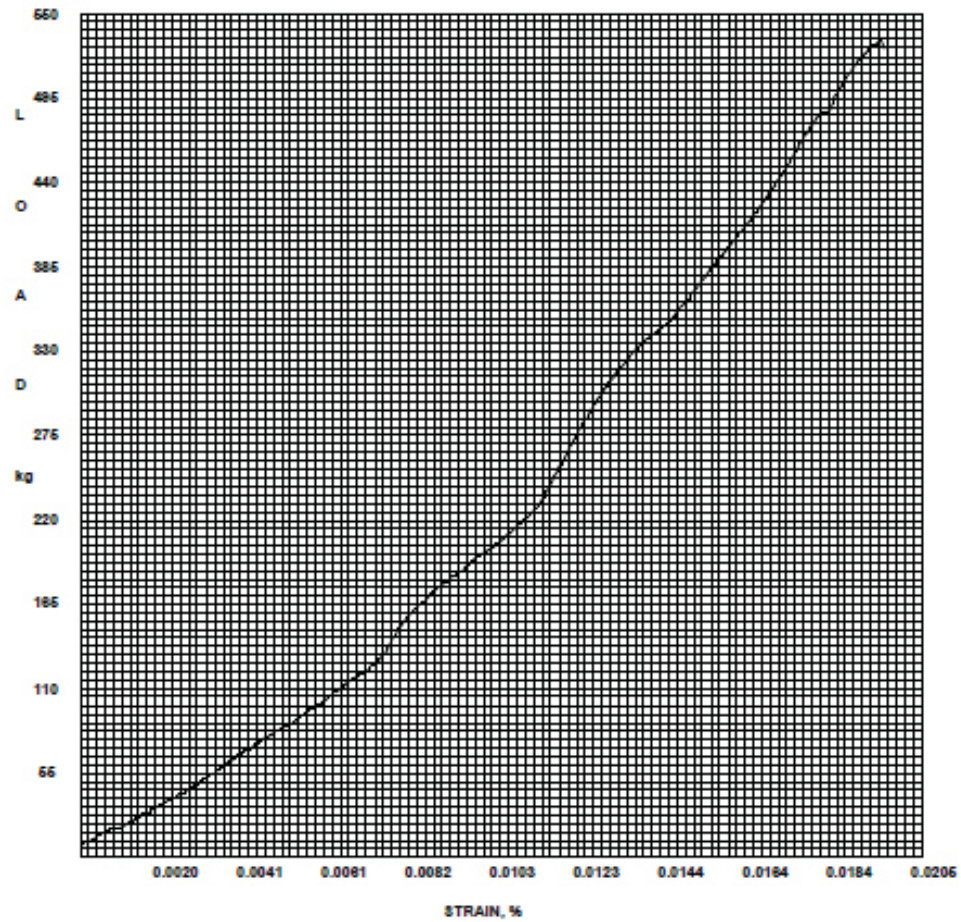


Figura 4. 24 Ensayo de adherencia de la muestra 7 (200mm de distancia con una relación combustible oxígeno de 0,50)

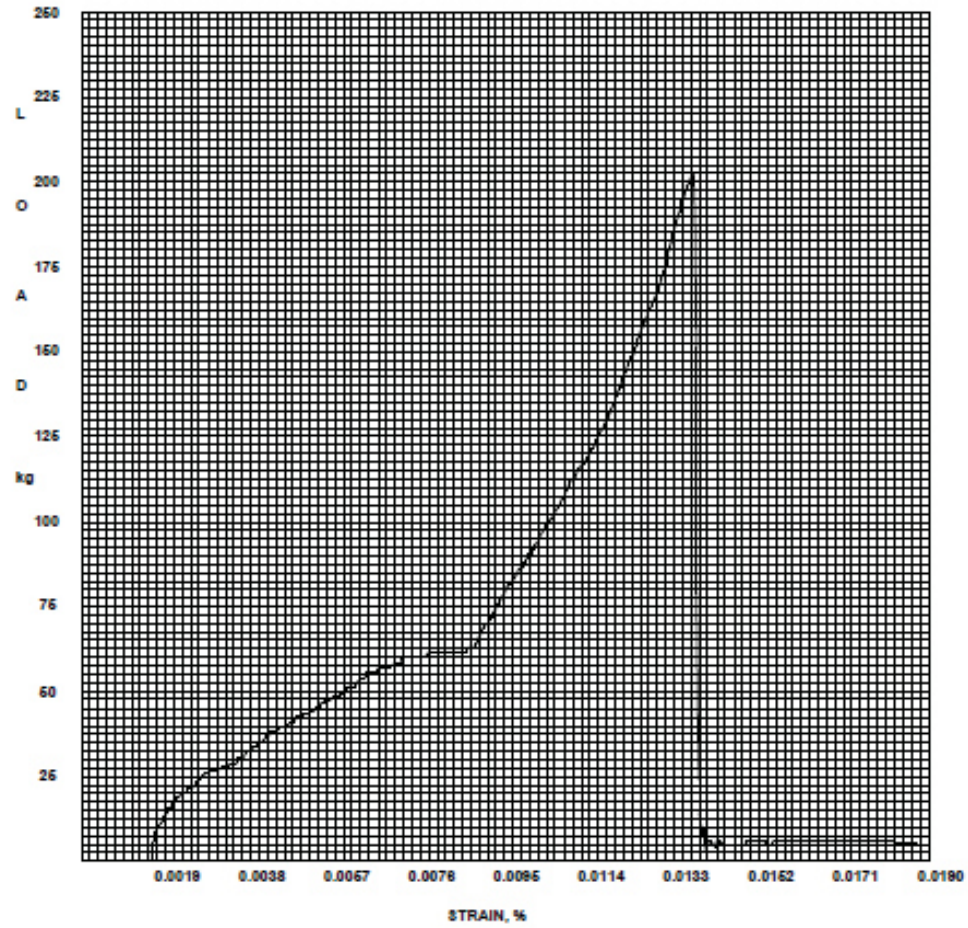


Figura 4. 46 Ensayo de adherencia de la muestra 8 (225mm de distancia con una relación combustible oxígeno de 0,50)

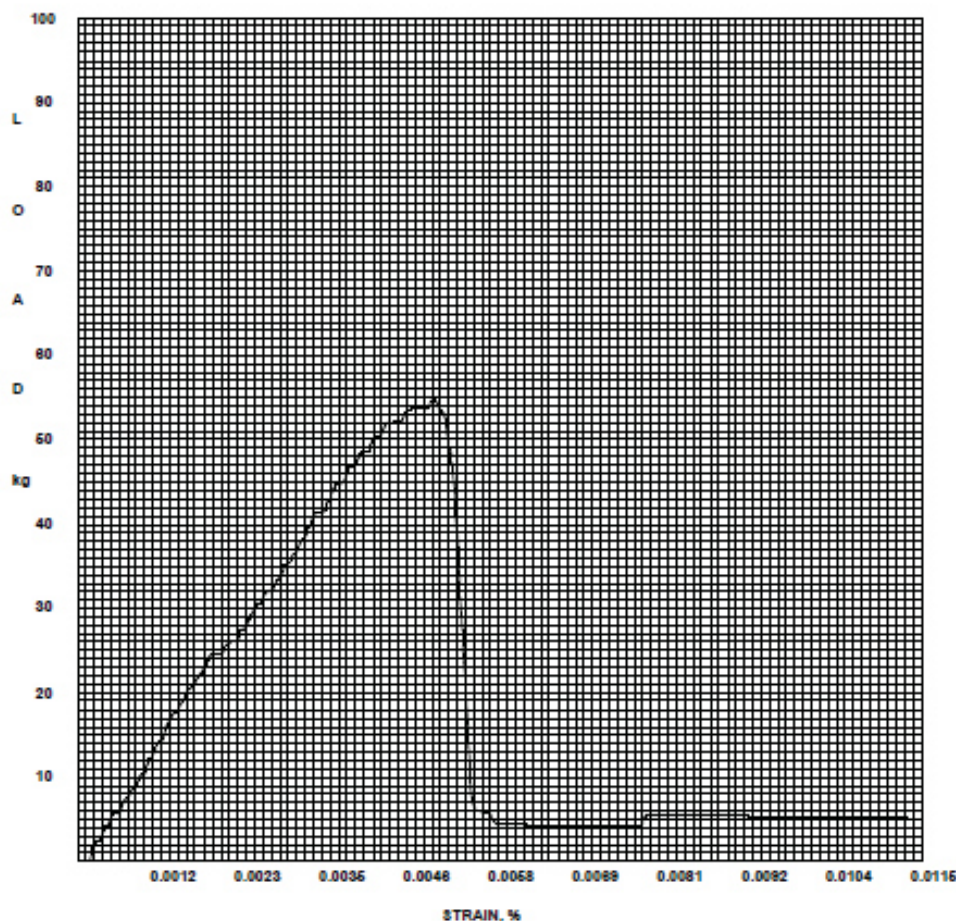


Figura 4. 47 Ensayo de adherencia de la muestra 9 (250mm de distancia con una relación combustible oxígeno de 0,50)

4.2 ANÁLISIS DE VARIANZA

Las tablas 4.11 y 4.12, muestran el análisis de varianza correspondiente al diseño de experimentos en las cuales se puede apreciar la gráfica de residuos que afectan al espesor y la distribución de dureza. Ver figura 4.48 y 4.49, respectivamente. Donde el efecto principal es la relación combustible-Oxígeno, seguida por la distancia de proyección estas dos variables son estadísticamente significativas con un valor de $p < 0.005$ lo que indica que manipular la relación combustible-Oxígeno y la distancia de proyección se tiene un mayor efecto sobre la deposición del material reparador en el sustrato (dureza y espesor), ya que estas variables afectan significativamente a la

velocidad de trayectoria de las partículas depositadas por lo tanto en la calidad del recubrimiento.

Tabla 4. 9 ANOVA de dos factores: Espesor vs. Relación Combustible/Oxígeno; Distancia

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Relación Combustible Oxígeno	2	33680,9	16840,4	275,57	0,000
Distancia	2	1444,2	722,1	11,82	0,021
Error	4	244,4	61,1	----	----
Total	8	35369,6	----	----	----

S = 7,817 R-cuad. = 99,31% R-cuad. (Ajustado) = 98,62%

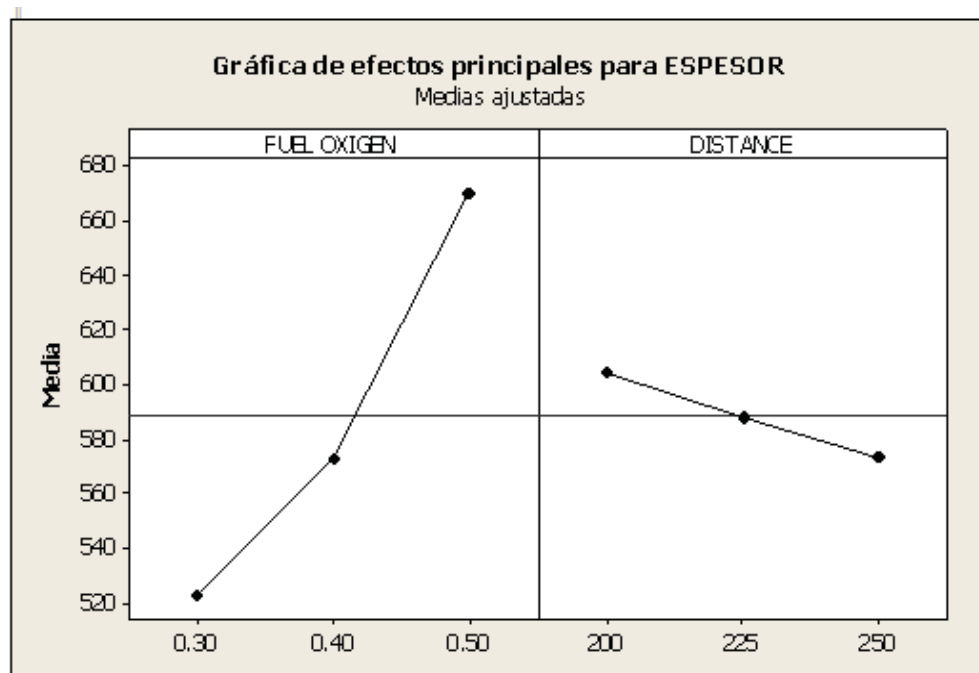
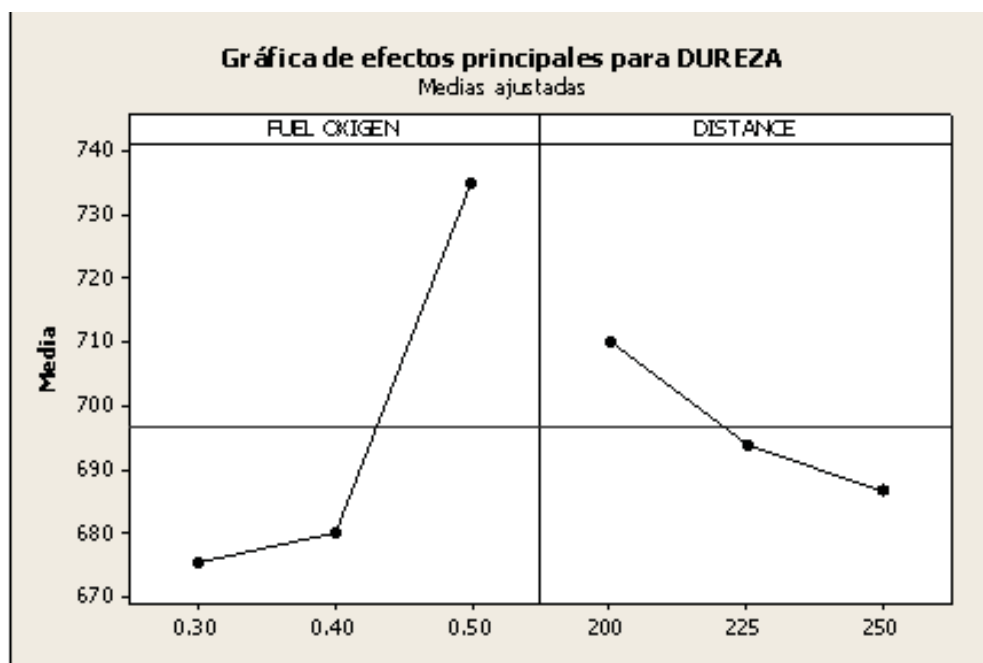


Figura 4. 2548 Grafica de residuos que afectan al Espesor poner las unidades

Tabla 4. 10 ANOVA de dos factores: Dureza vs. Relación Combustible/Oxígeno; Distancia

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Relación Combustible Oxígeno	2	6606,89	3303,44	311,32	0,000
Distancia	2	860,22	430,11	40,53	0,002
Error	4	42,44	10,61	----	----
Total	8	7509,56	----	----	----

S = 3,257 R-cuad. = 99,43% R-cuad. (Ajustado) = 98,87%

**Figura 4. 49** Grafica de residuos que afectan la Dureza igual. unidades

FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE LA TRAYECTORIA DE LA PARTÍCULA

Para formular el modelo matemático del sistema representado en la figura 4.50, el sustrato debe estar fijado sobre la mesa que se mueve en las tres direcciones y permite que el movimiento del sustrato deba ser a la velocidad uniforme y el flujo de material de recubrimiento constante. Para asegurar un espesor equivalente en toda su longitud. El sistema debe estar sujeto a las condiciones, siguientes:

- La fusión y solidificación del recubrimiento en el sustrato depende de la potencia de la pistola.
- Movimiento relativo entre el material de recubrimiento que se alimenta y el sustrato.
- El material de recubrimiento fundido y atomizado se deposita en la superficie del sustrato en forma de charco. La forma del recubrimiento que se deposita en el sustrato es aproximadamente semicilíndrica de radio r y representado en la figura 4.42.
- El recubrimiento aplicado en el sustrato se divide en tres zonas siendo las siguientes:
 - Recubrimiento líquido.
 - Recubrimiento que se solidifica, y
 - Recubrimiento sólido.

El modelo de las ecuaciones de transferencia de calor se utiliza para predecir el comportamiento para estas tres zonas, sujeta a las siguientes consideraciones:

- 1- La conductividad térmica y la difusividad térmica del material de recubrimiento son valores promedios de los componentes.
- 2- La difusividad de masa de cada elemento en la fase líquida es el valor promedio de la autodifusión bajo la temperatura local y la temperatura inicial.
- 3- El recubrimiento y el sustrato están en perfecto contacto térmico.
- 4- No hay autodifusión de masa en la fase sólida.
- 5- No hay convección en la fase líquida.

6- El recubrimiento fundido es una solución uniforme de composición igual a la mezcla inicial; su solidificación comienza al momento.

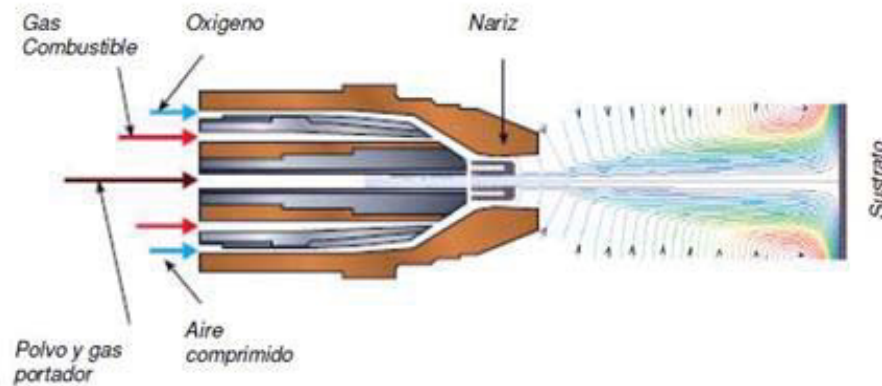


Figura 4.50 Representación esquemática HVOF

Con las consideraciones asumidas, las ecuaciones de transferencia de calor en el sustrato, la zona de solidificación y la zona líquida del recubrimiento, así como la ecuación de transferencia de masa, se utilizan para determinar la distribución de los átomos del soluto en la fase sólida; el modelo para las tres zonas y otras condiciones auxiliares se formulan como sigue:

a. Ecuaciones basadas en la transferencia de calor

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

- Zona del recubrimiento sólido

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_1}{\partial t} \quad (2)$$

$$t \geq 0 \quad 0 \leq x \leq a$$

- Zona de solidificación del recubrimiento

$$t \geq 0 \quad 0 \leq x \leq s(t)$$

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial T_2}{\partial t} \quad (3)$$

- Zona líquida del recubrimiento

$$t \geq 0 \quad s(t) \leq x \leq b$$

$$\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha^3} \frac{\partial T_3}{\partial t} \quad (4)$$

b) condiciones auxiliares

$$K_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = h_1(T_1 - T_0) \quad (5)$$

$$x = 0 \text{ y } t \geq 0$$

$$T_1(a, t) = T_2(a, t) \quad (6)$$

$$K_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = K_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \quad (7)$$

$$x = a \text{ y } t \geq 0$$

$$T_2[s(t), t] = T_3[s(t), t] = T_1[Ct, s(t)] \quad (8)$$

$$x = b \text{ y } t \geq 0$$

$$K_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} = h_3(T_3 - T_1) \quad (9)$$

$$x = b \text{ y } t \geq 0$$

$$K_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = K_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} = \rho c_t \frac{ds}{dt} \quad (10)$$

$$x = s(t) \text{ y } t \geq 0 \quad s(0) = a$$

Las condiciones dadas por las ecuaciones del (1) al (3) y las condiciones auxiliares (4) al (10) son formuladas sobre la base de las siguientes consideraciones:

La temperatura inicial T_3 es igual a $T_3 = T_p + 150^\circ\text{C}$, donde T_p es la temperatura de fusión del material de recubrimiento, al cual se añade entre 100 a 150°C más para mantener totalmente la fase líquida.

En la figura 4.51 se muestra la representación gráfica unidimensional del problema

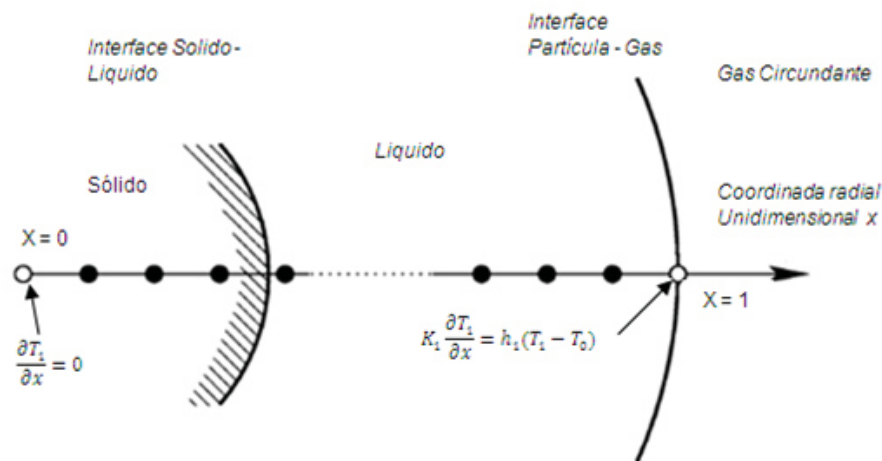


Figura 4.51 Representación gráfica unidimensional del problema

El modelo se comprueba con los parámetros siguientes:

- ❖ Potencia del horno.
- ❖ Velocidad de sustrato.
- ❖ Fracción (en masa) del soluto en la mezcla.
- ❖ Calores específicos, calores de fusión, conductividad térmica y densidad, de los componentes del recubrimiento.

El modelo se comprueba con los parámetros siguientes:

- ❖ Potencia de la pistola.
- ❖ Velocidad de sustrato.
- ❖ Fracción (en masa) del soluto en la mezcla.
- ❖ Calores específicos, calores de fusión, conductividad térmica y densidad, de los componentes del recubrimiento.

NOMENCLATURA

a, Ancho del sustrato

h₁ Coeficiente de transferencia del calor en la frontera del sustrato

C_{p3} Calor específico promedio del material de recubrimiento frontera del sustrato

C_{f3} Calor latente de fusión del recubrimiento

h₂ Límite de la superficie de recubrimiento

F Fracción de energía del horno

s(t) Posición de la intercara líquido-sólido

T_o Temperatura ambiente

K_v Conductividad térmica en la región i,

T_f Temperatura de fusión

T_v Temperatura en región i

v Velocidad del sustrato (m/min).

DESARROLLO DE MODELO DE TRAYECTORIA DE PARTÍCULA MEDIANTE DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.

Para la realización de la simulación se tomaron las condiciones de frontera enlistadas en el modelo matemático a continuación se muestra el procedimiento para la obtención de los resultados y observar el efecto del calor de entrada en la microestructura, propiedades mecánicas y tribológicas en soldaduras por la técnica High Velocity Oxi-Fuel en aceros herramienta grado D2 para trabajado en frío.

Modelo 3D de Boquilla

- ❖ Modelo Negativo
- ❖ Modelo Trayectoria Gas
- ❖ Modelo Mallado: Modelo Negativo, Trayectoria de Gas y Placa Metálica

Condiciones de Frontera

- ❖ Modelo Boquilla
- ❖ Trayectoria de Gas

Resultados Análisis de Fluidos

- ❖ Perfil de Velocidades
- ❖ Perfil de Presiones
- ❖ Perfil de Temperaturas

Análisis Estructural

- ❖ Modelo 3D utilizado para análisis Estructural y Material
- ❖ Condiciones de Frontera de Análisis Estructural

Resultados Análisis Estructural

- ❖ Desplazamientos de Boquilla
- ❖ Esfuerzo de von mises

Conclusiones

Modelo 3D de Boquilla

Se realizó el modelo de sistema para la deposición de la partícula en trayectoria de un equipo HVOF DJ 2700 el cual fue utilizado para la aplicación de las partículas Fe-Cr-Mo en los sustratos de acero D2.

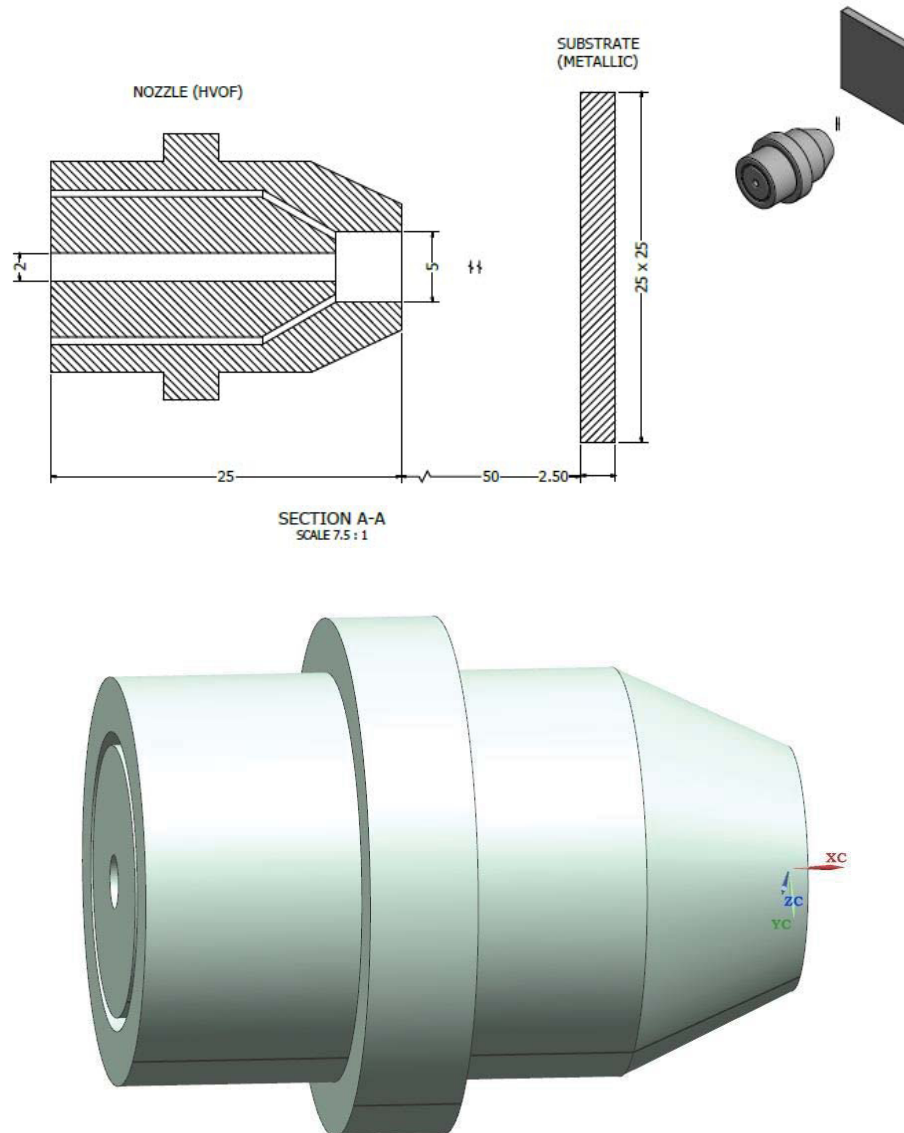


Figura 4.52. Modelo Boquilla del equipo HVOF DJ 2700 (mm)

Primeramente, se obtuvo el modelo negativo de la boquilla del equipo HVOF DJ 2700 para simular la entrada de gases, Ver figura 4.53.

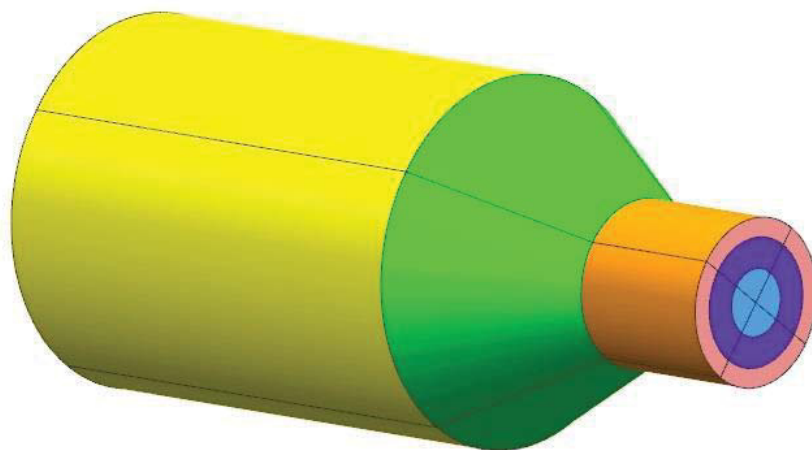


Figura 4.53. Modelo Negativo de la Boquilla del equipo HVOF DJ 2700

Se modelo la trayectoria del gas que impactara en la placa metálica, Ver figura 4.54.

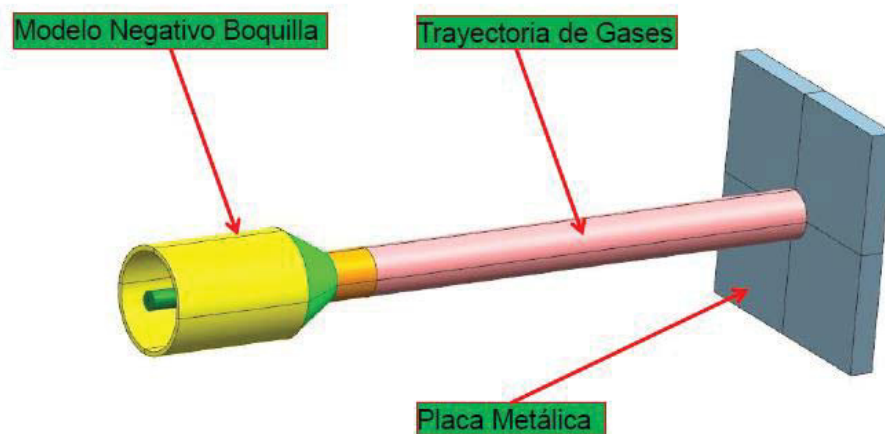


Figura 4.54. Modelo Negativo Boquilla del equipo HVOF DJ 2700 y Trayectoria Discretizada

Resumen Modelo	Elemento Finito
Entidad	Cantidad
Elementos	56520
Nodos	63416

Mallado del modelo negativo de la Boquilla, trayectoria y placa metálica todo con hexaedros, Ver figura 4.55.



Figura 4.55. Modelo completo mallado con hexaedros

Condiciones de Frontera

- La fusión y solidificación del recubrimiento en el substrato depende de la potencia de la pistola.
- Movimiento relativo entre el material de recubrimiento que se alimenta y el substrato.
- El material de recubrimiento fundido y atomizado se deposita en la superficie del substrato en forma de charco. La forma del recubrimiento que se deposita en el substrato es aproximadamente semicilíndrica de radio r y representado en la figura anterior.
- En recubrimiento aplicado en el substrato se divide en tres zonas siendo las siguientes:
 - Recubrimiento líquido.
 - Recubrimiento que se solidifica, y
 - Recubrimiento sólido.

El modelo de las ecuaciones de transferencia de calor se utiliza para predecir el comportamiento para estas tres zonas, sujeta a las siguientes consideraciones:

- 1- La conductividad térmica y la difusividad térmica del material de recubrimiento son valores promedios de los componentes.
- 2- La difusividad de masa de cada elemento en la fase líquida es el valor promedio de la autodifusión bajo la temperatura local y la temperatura inicial.

- 3- El recubrimiento y el sustrato están en perfecto contacto térmico.
- 4- No hay autodifusión de masa en la fase sólida.
- 5- No hay convección en la fase líquida.
- 6- El recubrimiento fundido es una solución uniforme de composición igual a la mezcla inicial; su solidificación comienza al momento.

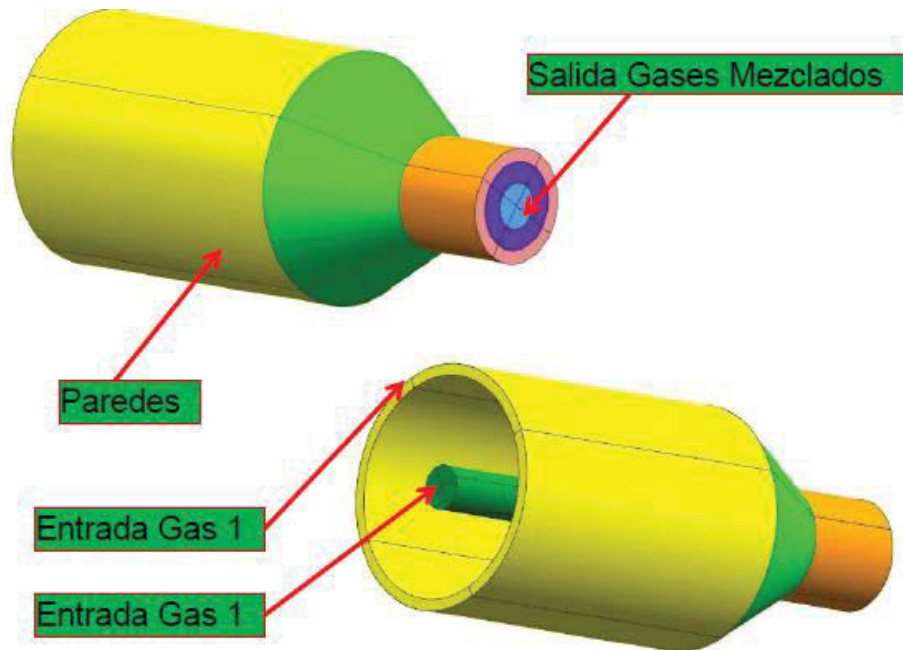


Figura 4.47. Condiciones de Frontera Boquilla.

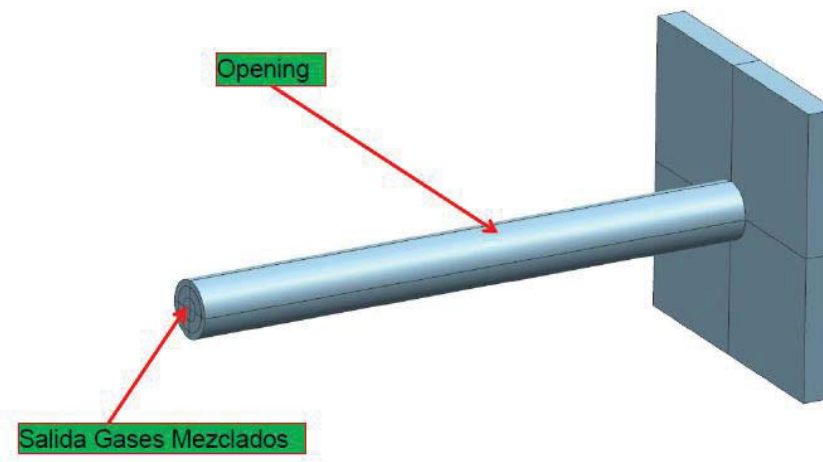


Figura 4.56. Condiciones de Frontera Trayectoria.

Con las consideraciones asumidas, las ecuaciones de transferencia de calor en el sustrato, la zona de solidificación y la zona líquida del recubrimiento, así como la ecuación de transferencia de masa, se utilizan para determinar la

distribución de los átomos del soluto en la fase sólida; el modelo para las tres zonas y otras condiciones auxiliares se formulan como sigue:

a. Ecuaciones basadas en la transferencia de calor

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

- Zona del recubrimiento sólido

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_1}{\partial t} \quad (2)$$

$$t \geq 0 \quad 0 \leq x \leq a$$

- Zona de solidificación del recubrimiento

$$t \geq 0 \quad 0 \leq x \leq s(t)$$

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial T_2}{\partial t} \quad (3)$$

- Zona líquida del recubrimiento

$$t \geq 0 \quad s(t) \leq x \leq b$$

$$\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha^3} \frac{\partial T_3}{\partial t} \quad (4)$$

b) condiciones auxiliares

$$K_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = h_1 (T_1 - T_0) \quad (5)$$

$$x = 0 \text{ y } t \geq 0$$

$$T_1(a, t) = T_2(a, t) \quad (6)$$

$$K_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = K_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \quad (7)$$

$$x = a \text{ y } t \geq 0$$

$$T_2[s(t), t] = T_3[s(t), t] = T_1[Ct, s(t)] \quad (8)$$

$$x = b \text{ y } t \geq 0$$

$$K_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} = h_3(T_3 - T_1) \quad (9)$$

$$x = b \text{ y } t \geq 0$$

$$K_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = K_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} = \rho c_t \frac{ds}{dt} \quad (10)$$

$$x = s(t) \text{ y } t \geq 0 \quad s(0) = a$$

Las condiciones dadas por las ecuaciones del (1) al (3) y las condiciones auxiliares (4) al (10) son formuladas sobre la base de las siguientes consideraciones:

La temperatura inicial T_3 es igual a $T_3 = T_p + 150^\circ\text{C}$, donde T_p es la temperatura de fusión del material de recubrimiento, al cual se añade entre 100 a 150°C más para mantener totalmente la fase líquida.

En la figura 4.49, se muestra la representación gráfica unidimensional del problema

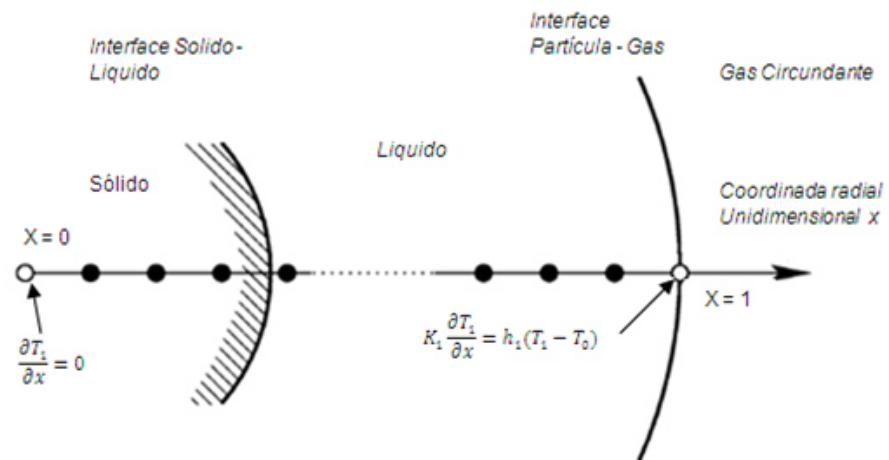
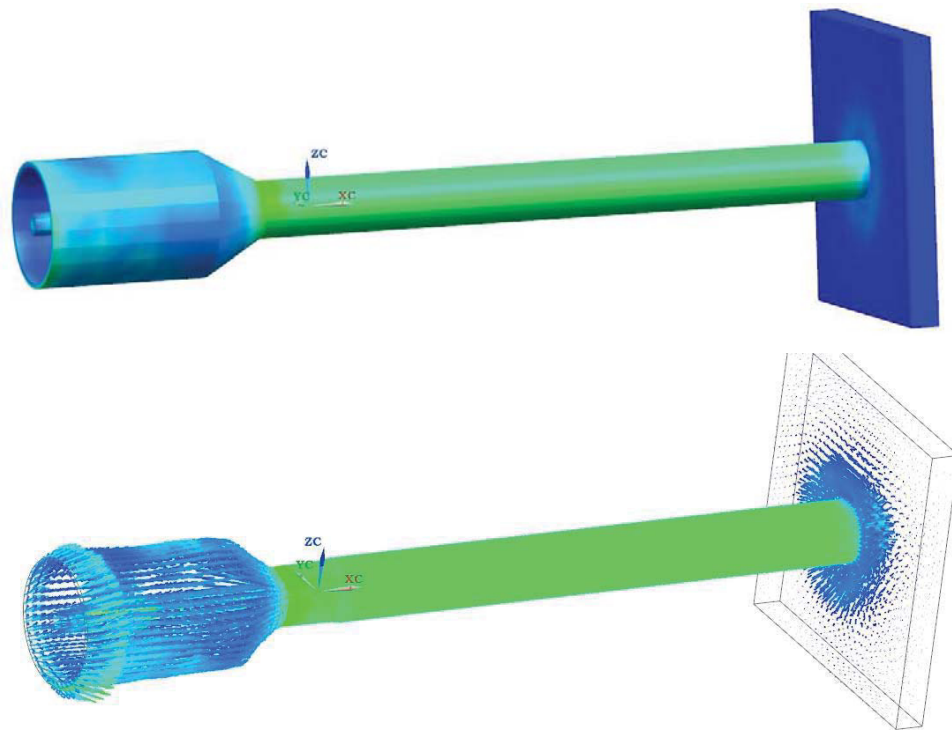
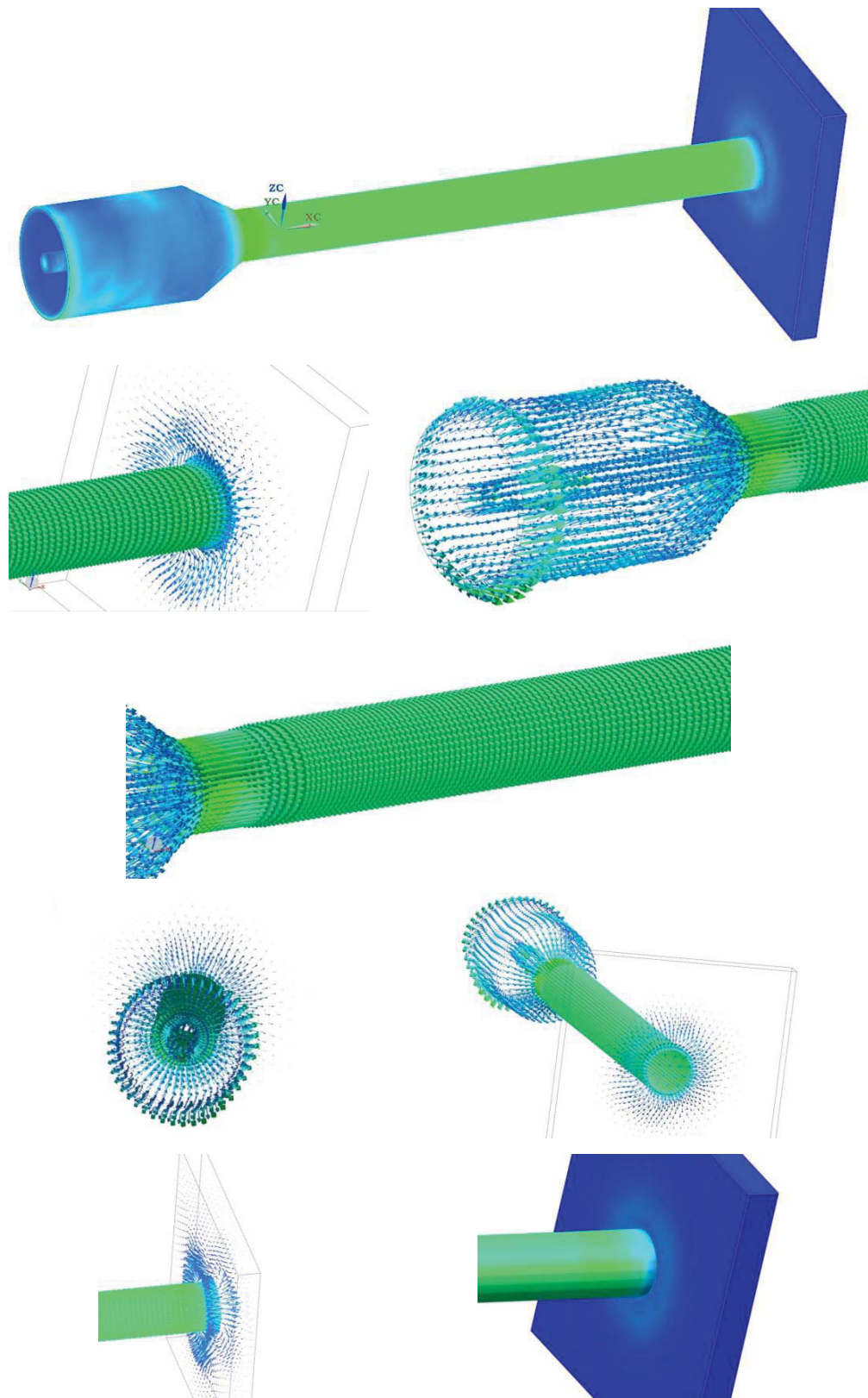


Figura 4.57 Representación gráfica unidimensional del problema





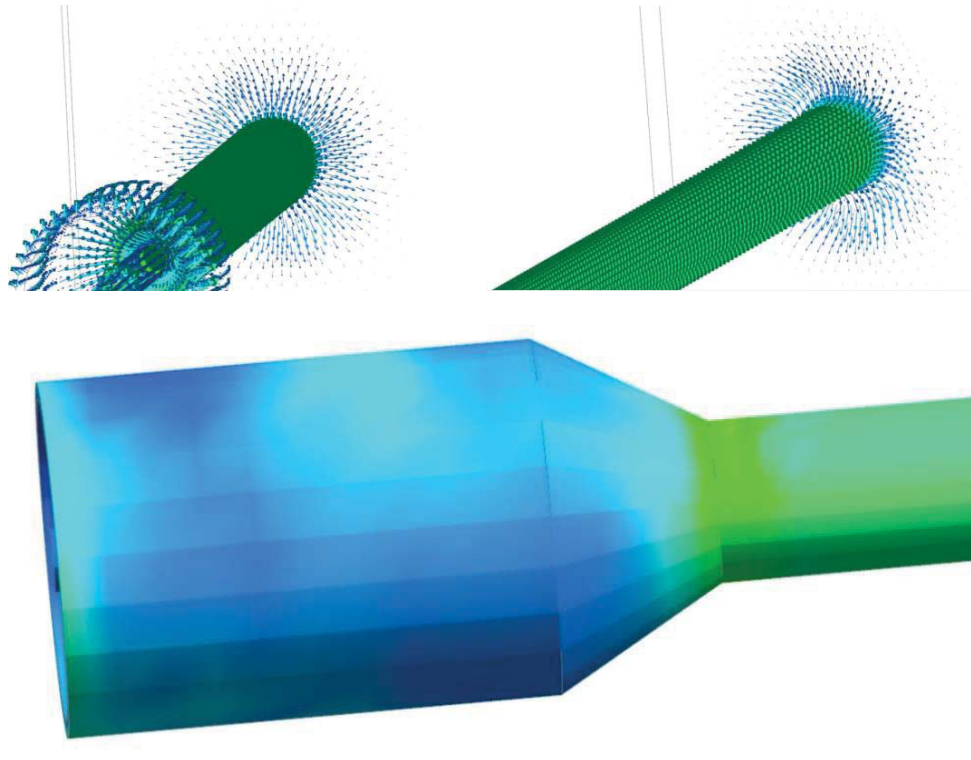
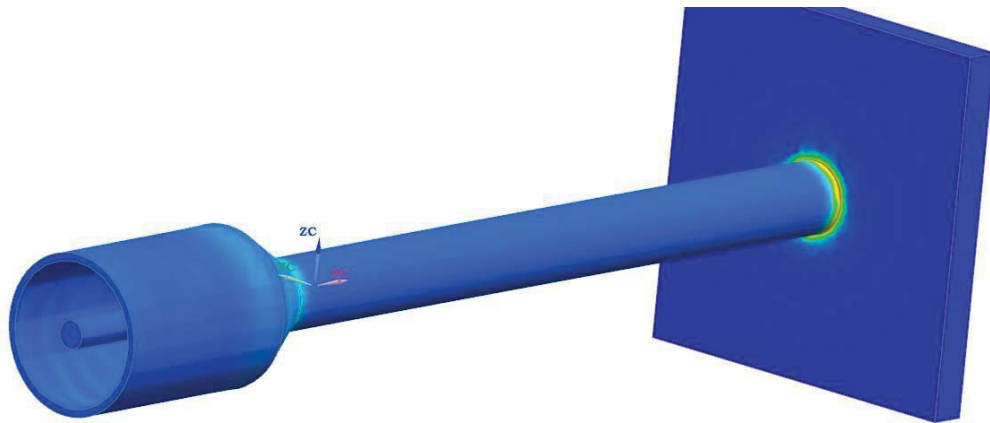


Figura 4.58. Perfil de Velocidades.

Posteriormente se procedió a elaborar el perfil de presiones de los gases combustibles de la partícula Fe-Cr-Mo en trayectoria antes del impacto en el sustrato de acero grado herramienta, a continuación, se muestra el perfil de presiones obtenidas.



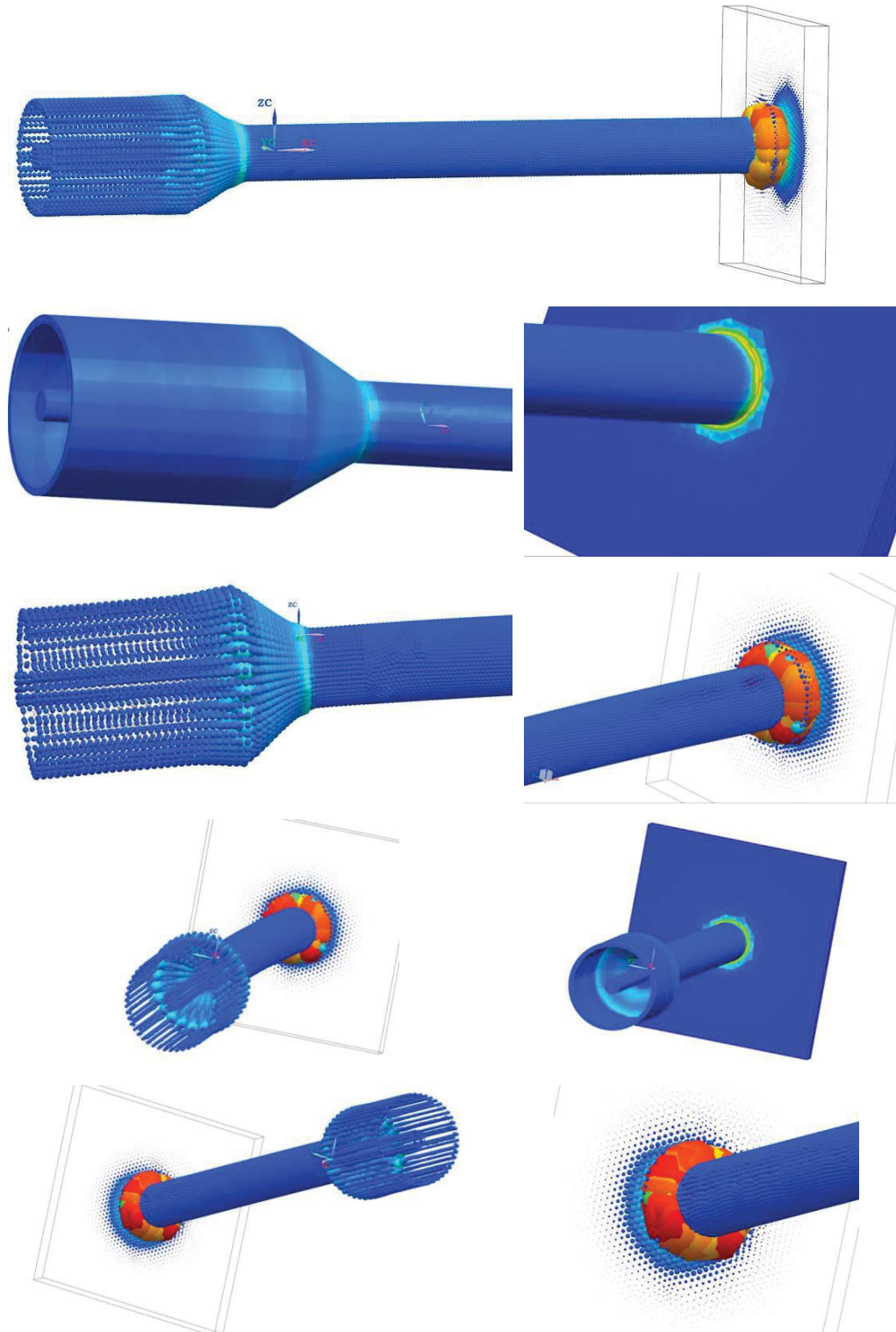


Figura 4.59. Perfil de Presiones.

A fin de validar la transferencia de calor antes del impacto de la partícula en trayectoria se realizó el perfil de temperaturas en el cual se puede observar

que la temperatura máxima del material Fe-Cr-Mo antes del impacto con el sustrato grado herramienta es de 667°C con lo cual no ocurre una transformación de fase de austenita a martensita, con lo que la estructura original del herramental se conserva adicionando un material depositado con una resistencia al desgaste superior, a continuación se muestra el modelo de temperaturas.

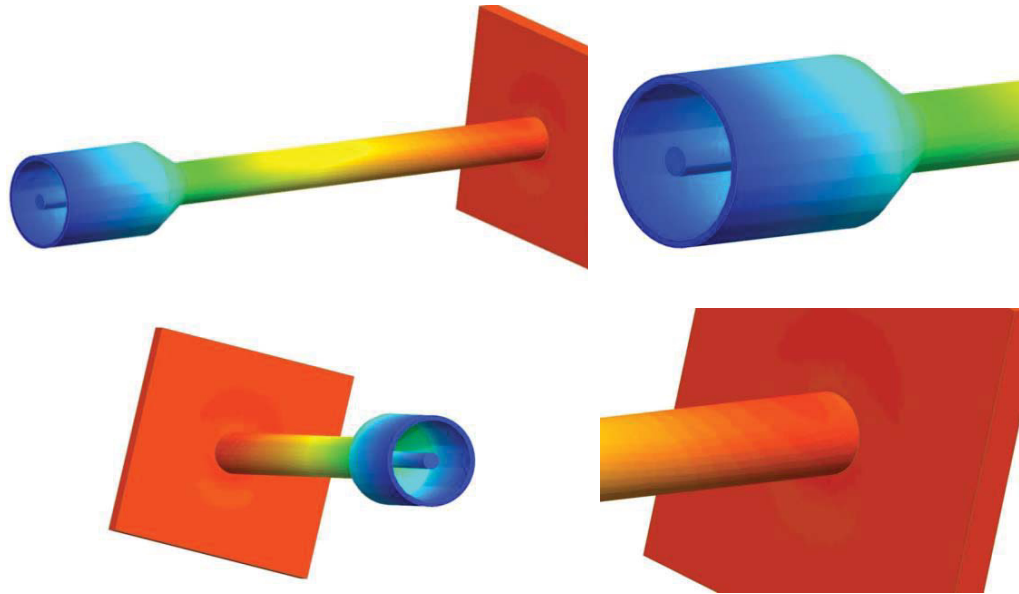


Figura 4.60 Perfil de temperatura

Asimismo, se realizó el análisis estructural de la boquilla del sistema de proyección térmica de alta velocidad. A continuación, se muestra los resultados obtenidos:

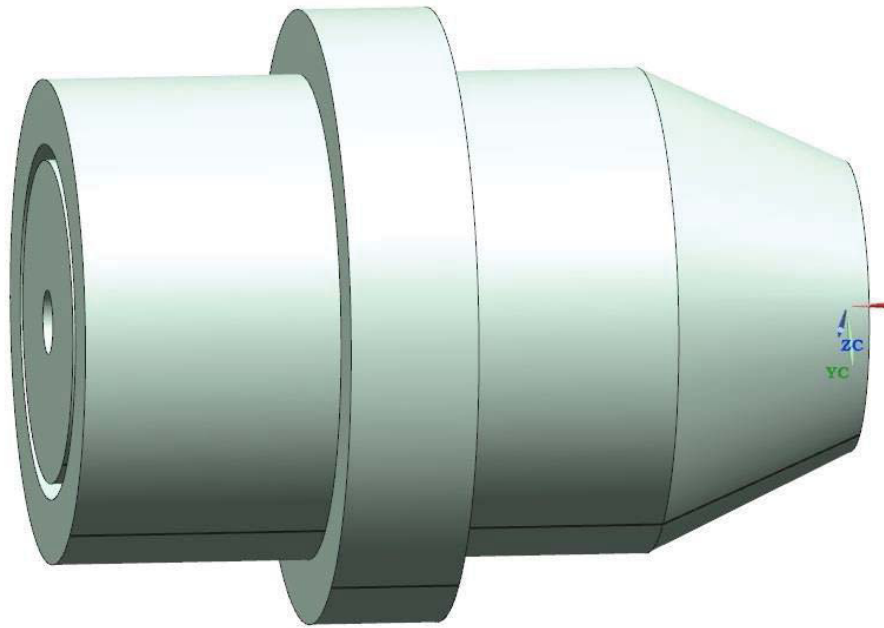
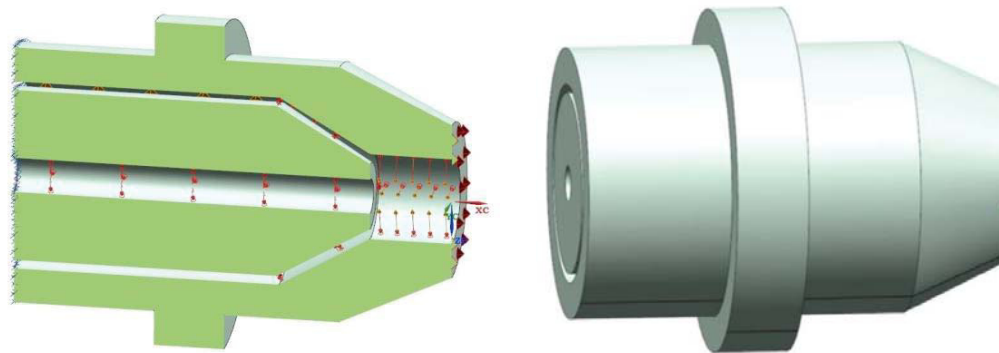


Figura 4.61. Modelo Boquilla para Análisis Estructural.



Presión y Temperaturas mapeadas de Fijo en todas las direcciones
 Análisis de Fluidos $U_x=U_y=U_z=0$

Figura 4.62. Condiciones de Frontera para Análisis Estructural.

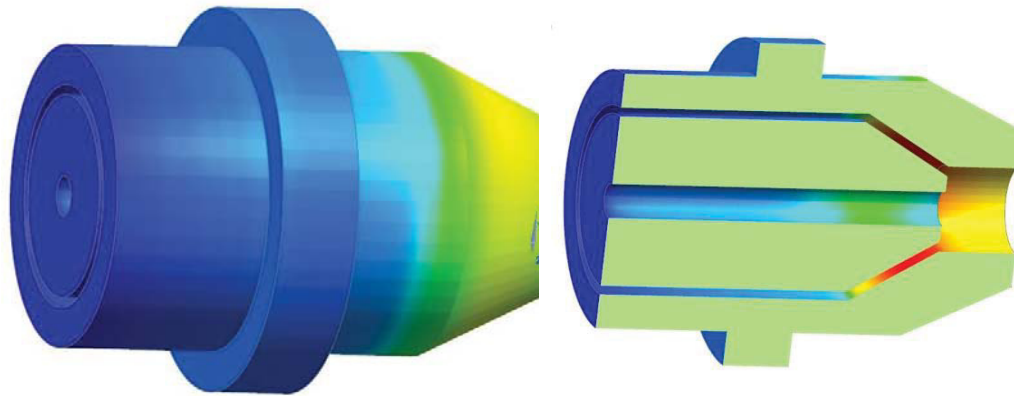


Figura 4.63. Desplazamientos.

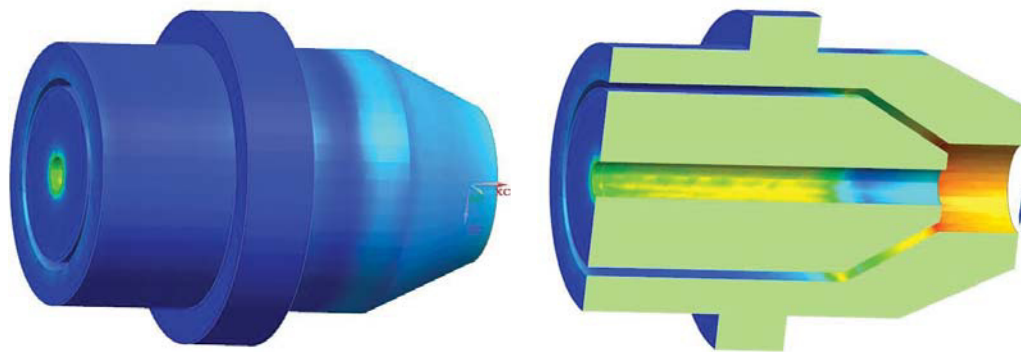


Figura 4.64. Esfuerzo von mises

El modelo se comprueba con los parámetros siguientes:

- Potencia del sistema de proyección térmica de alta velocidad
- Velocidad de sustrato
- Fracción (en masa) del soluto en la mezcla.
- Calores específicos, calores de fusión, conductividad térmica y densidad, de los componentes del recubrimiento.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Sobre la base de los estudios realizados en esta investigación se concluye lo siguiente:

El proceso tecnológico de conformación de metales tiene una característica esencial la cual consiste en el alto costo de las herramientas que intervienen en el mismo. Estas generalmente están sometidas a severas condiciones de trabajo, tales como el desgaste en sus zonas de trabajo, cargas de impacto, trabajo en caliente, los esfuerzos a tensión ó compresión de su estructura debido a las configuraciones complejas de estas herramientas y por tanto, la no uniformidad en la distribución de las cargas a que se someten, entre otros aspectos. El uso de la soldadura de reparación es una opción principal, ya que este proceso posibilita devolver a la pieza, con suficiente eficiencia y bajo costo, sus características dimensionales, propiedades mecánicas y tribológicas superiores. Las aleaciones Fe-Cr-Mo son usadas en recubrimientos para la protección de los componentes sometidos al desgaste y corrosión. Los recubrimientos de rociado térmico a alta velocidad (HVOF) en aleaciones Fe-Cr-Mo han sido reportados con buenos resultados en el campo de las proyecciones para los aceros grado herramienta para trabajado en frío.

El HVOF es un método atractivo para aplicar soldadura de revestimiento y recuperar diámetros. Nuevas superficies pueden ser provistas sin el material

de distorsión causado por soldadura. Para aquéllos materiales que son sensibles al agrietamiento y cambios en la composición debidos a la formación de fases frágiles, la formación de carburos primarios y secundarios $M_{23}C_6$ y M_7C_6 . Debido a las condiciones del proceso, las cuales combinan una relativamente baja temperatura de flama con un bajo tiempo de exposición (Este método emplea una alta presión de un combustible (Propileno, acetileno, propano o gases de hidrógeno) para producir temperaturas del gas superior a los 3029 °K y para generar una supersónica o hipersónica velocidad del gas, de aproximadamente 2000 m/s, más de cinco veces la velocidad del sonido. El acero grado herramienta para trabajado en frío es un material susceptible al agrietamiento y formar estructuras fuera de equilibrio lo cual es un factor crítico en este tipo de componentes. La microestructura y las propiedades físicas de los recubrimientos aplicados por soldadura están determinadas por las propiedades físicas y químicas de las partículas impregnadas en los sustratos y los materiales de aporte usados. La presente investigación considera la aplicación del HVOF a componentes desgastados y comparativa con la aplicación de soldadura por proceso convencional GTAW y observar propiedades microestructurales, dureza y resistencia al desgaste, así como la calidad de la reparación entre los dos métodos propuestos.

La técnica convencional GTAW mostró resultados aceptables en cuanto a la resistencia al desgaste y propiedades similares a la del herramental, el aporte Stellite 12 es el mejor resultado.

El diseño de experimentos Taguchi identifico que la relación flujo de combustible/oxígeno y la distancia, fueron los parámetros más influyentes en la calidad del revestimiento aplicado por la técnica de HVOF, ya que afectan la velocidad de la partícula que está “en trayectoria”, es decir, antes del impacto.

El análisis mediante la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) mostró que el material reparador depositado en el sustrato contiene una baja cantidad de óxido debido a la relación de combustible/oxígeno usada fue la menor (0,30). Por lo tanto, dentro del rango explorado, la porosidad está más

estrechamente relacionada con la relación de combustible-oxígeno impactando en la densidad del recubrimiento depositado.

El contenido de óxido aumentó conforme la relación del combustible fue mayor en su contenido de oxígeno, dicha oxidación afecta en la adherencia del material reparador en el sustrato, originando sitios concentradores de esfuerzos los cuales propiciarían un desprendimiento del depósito cuando este sea sometido a tensión.

Este tipo de recubrimiento ha sido exitosamente adherido al material logrando una deposición entre los rangos de 500 a 700 micras. El ensayo de dureza en el recubrimiento demuestra que el polvo seleccionado para esta aplicación cumple con las propiedades originales del herramental pudiendo así regresar el herramental a servicio.

BIBLIOGRAFÍA

1. J.M. Costa, J.M. Ferreira, C. Capela, Engineering Failure Analysis, Vol. 6, 93 (2008).
2. R. L Chavanne, Welding Journal, Vol. 62, 15 (1999).
3. D. Dasa, A.K. Duttab, K.K. Rayc. Wear Journal Vol. 31, 297 (2008).
4. L.P. Borrego, J.T.B. Pires, Engineering Failure Analysis Vol. 8, 596 (2008).
5. J. Saaedi, T.W. Coyle, S. Mirdamadi, H. Arabi, J. Mostaghimi a. Surface & Coatings Technology 202 (2008) 5804–5811
6. J. Karthikeyan, C.C. Berndt, S. Reddy, J-Y Wong, A.H. King and H. Herman, Welding Journal, Vol. 81, 121 (1998).
7. Losano, G.; Morgenfeld, J. (2001), Criterios para evaluar el riesgo de fisuración en caliente. Revista Soldadura volumen 4, No 11. pp 326-327.
8. Y.C. Lin*, S.W. Wang, K.E. Wu. The wear behaviour of machine tool guideways clad with W–Ni, W–Co and W–Cu using gas tungsten arc welding. Surface and Coatings Technology 172 (2003) 158–165.
9. Z. Geng a,b, S.Li a, D.L.Duan a,n, Y.Liu a. Wear behaviour of WC–Co HVOF coatings at different temperatures in air and argon. Wear 330-331(2015)348–353.
- 10.- J.M. Costa A*, J.M. Ferreira A, C. Capela B, (2008), Fracture toughness of the heat affected zone on Nd-YAG laser welded joints, Engineering Failure Analysis Volume xxx, Number xxx pp. xxx–xxx.
- 11.- A.J. Allen, J. Ilavsky, G.G. Long, J.S. Wallace, C.C. Berndt, H. Herman. Microstructural characterization of yttria-stabilized zirconia plasma-sprayed deposits using multiple small-angle neutron scattering, *Acta. Mater.* 49 (2001) pp1661 1675.
- 12.- R. Ebner, H. Leitner, F. Jeglitsch, D. Caliskanoglu (1999) "Tool Steels in the next century" 5th International Conference on Tooling pp. 56-59.

- 13.- H. Berns (1992) "New Materials Processes Experiences for Tooling"
International European Conference on Tooling Materials Interlaken pp.
113-117.
- 14.- M.B. Beardsley,(1997) Think Thermal Barrier, Coatings for Diesel
Engines, vol. 6, number 2 pp. 181-186.
- 15.- C. Bernhardt, (1994), particle size analysis, chapman & hall
- 16.- J. Karthikeyan, C.C. Berndt, S. Reddy, J-Y Wong, A.H. King and H.
Herman, (1998), nanomaterial deposits formed by DC plasma spraying
of liquid feedstocks, j. am, ceram. Soc., vol 81, number 1, pp. 121-128.
- 17.- L. Pawlowski. The Science and Engineering of Thermal Spray Coating.
Vol 1.
New York: Wiley, 1995, p. 412. ISBN: 978-0-471-95253-4.
- 18.- G. Bolelli, V. Cannillo, L. Lusvarghi, T. Manfredini. "Wear behaviour of
thermally sprayed ceramic oxide coatings", Wear. Vol. 261, pp. 1298-
1315, 2006.
- 19.- ASM INTERNATIONAL. Metals Handbook: Friction, Lubrication and
Wear technology Volume 18. 1992.
- 18.- Piedra, Elsa. Estudio y desarrollo de recubrimientos proyectados
térmicamente aplicación como elementos protectores. Informe de
avance de tesis Doctoral, Universidad de Oviedo. 2007.
- 19.- J.R. Davis. Handbook of Thermal Spray Technology. ASM International.
October
2004. ISBN: 0871707950.
- 20.- L. Pawlowski. The Science and Engineering of Thermal Spray Coating.
Vol 1. New York: Wiley, 1995, p. 412. ISBN: 978-0-471-95253-4.

- 21.- R. S. Lima, A. Kucuk and C. C. Berndt, "Evaluation of microhardness and elastic modulus of thermally sprayed nanostructured zirconia coatings", *Surface and Coatings Technology*, Volumen 135, p.p. 166-172, January 2001.
- 22.- S. Deshpande, A. Kulkarni, S. Sampath, H. Herman. Application of image analysis for characterization of porosity in thermal spray coatings and correlation with small angle neutron scattering. *Surface & Coatings Technology* 187 (2004) 6– 16
- 23.- A.J. Allen, J. Ilavsky, G.G. Long, J.S. Wallace, C.C. Berndt, H. Herman. Microstructural characterization of yttria-stabilized zirconia plasma-sprayed deposits using multiple small-angle neutron scattering, *Acta. Mater.* 49 (2001) pp1661 1675.
- 24.- Hinojosa, Moises y Reyes M., Martin. La rugosidad de las superficies. *Topometria. Ingenierias*, Abril-Junio 2001, Vol IV. No. 11.
- 25.- ASM INTERNACIONAL. Metals Handbook: Machining. Volumen 16. Ninth Edition. 1992.
- 26.- ASM INTERNACIONAL. Metals Handbook: Mechanical Testing and Evaluation. Volumen 8. Ninth Edition. 1992.
- 27.- R.S. Lima, S.E. Kruger, G. Lamouche, and B.R. Marple. Elastic Modulus Measurements via Laser-Ultrasonic and Knoop Indentation Techniques in Thermally Sprayed Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 52—Volume 14(1) March 2005.
- 26.- Kurt Streckera, Sebastião Ribeiro, Michael-Johannes Hoffmann. Fracture Toughness Measurements of LPS-SiC: A Comparison of the Indentation Technique and the SEVNB Method. *Materials Research*, Vol. 8, No. 2, 121-124, 2005.

- 27.- Díaz Cedré, Eduardo; Ortiz Méndez, Tamara Ma. (2003), Curso de Recuperación de Piezas. Universidad del Valle del Cauca. Cali. Colombia, pp 18-26
- 28.- Weld Mold Company. (2008), Technical Welding Handbook. Product Catalog, Michigan USA. Pp.85
- 29.- Burgos Solas, José. (1996), Relleno superficial por soldadura. Curso recuperación de piezas por soldadura. Universidad Central de Venezuela. pp 216-222.

Listado de Figuras

Figura 2. 1 Aspecto general de los moldes utilizados en la industria automotriz: a) molde para trabajado en frío, b) molde para trabajado en caliente, y c) molde para inyección de plástico. (Weld mold company 2000).	23
Figura 2. 2 Aplicaciones de aceros para trabajado en frío (B. Salas 1996).	26
Figura 2. 3 Metalografía del acero D2, con diferentes técnicas de ataque: a) Atacada con Nital al 10% , revela los bordes de granos, carburos y Martensita ligera; b) Atacada con Picral y HCl al 4%; c) Teñida en caliente durante 5 minutos a 540 °C, después de atacar con 10% de Nital para producir mayor contraste y revelar, la austenita retenida. d) Ataque con Superpicral, revela austenita retenida como una fase blanca, igualmente revelado como fases blancas aparecen los carburos. (ASM Handbook Metallographic & Microestructure 1998).	27
Figura 2. 4 Ángulo de incidencia de partículas abrasivas (J. Streeter 2002)	29
Figura 2. 5 Desgaste de abrasión bajo esfuerzo (C. Howard ,2004).	30
Figura 2. 6 Desgaste de abrasión por desgarramiento. (C. Howard ,2004)	31
Figura 2. 7 Desgaste de impacto. (C. Howard ,2004)	31
Figura 2. 8 Mecanismo de desgaste de fricción (J. Streeter 2004).	34
Figura 2. 9 Áreas sensibles al agrietamiento: a) Cercano a un ángulo interior, b) En un escalón, c) Cercano a ángulos interiores, d) Cercano a un inserto y e) Reparación de la cavidad en un molde. (S. Horo. 1999).	44
Figura 2. 10 Forma del hundimiento: a) Soldadura de reparación después de maquinado y b) Vista Transversal (S. Horo. 1999).	45
Figura 2. 11 Técnica para contrarrestar el hundimiento: a) Sección transversal antes de la soldadura, b) Cordones finos en la primera pasada y c) Reparación completa. (S. Horo. 1999).	46
Figura 2. 12 Representación de socavaduras a ambos lados de un depósito: a) Sección de moldes separados, b) Vista transversal (S. Horo. 1999).	47
Figura 2. 13 Esquema de la técnica de arrastre para contrarrestar la socavadura. a) Se deposita con sentido desde el centro hasta el borde de la zona de hundimiento b) se sitúa la varilla contra el depósito y se reduce el amperaje c) mientras el depósito está en estado plástico se arrastra la varilla hacia el borde, d) se extingue el arco y se desprende la varilla cuando aún esté en estado plástico. (B. Salas 1996).	47
Figura 2. 14 a) sección de una herramienta a la que se le realizará una reparación mediante un depósito a tope de penetración completa b) sección completamente restringida c) vista desde A, penetración completa de la primera pasada. Siempre se debe soldar primero por el lado de la restricción d) resanar la primera pasada y completar las pasadas de raíz (B. Salas 1996).	48
Figura 2. 15 Formación de la capa (ASM Handbook 1998)	50
Figura 2. 16 Cañón de plasma-spray (ASM Handbook 1998).	52
Figura 2. 17 Tamaño de partícula y distribución en recubrimiento de acero D2 (T. S. Sidhu, etal. 2005).	54
Figura 2. 18 a) Temperatura del plasma y b) velocidad de partícula (ASM Handbook 1998).	55
Figura 2. 19 Formación de un recubrimiento, (J. Saaedi T. etal. 2009).	56
Figura 2. 20 Muestras de matrices reparadas por la técnica de HVOF (J.C. Tan, etal. 1999).	60
Figura 2. 21 Recubrimiento en la microestructura de un acero grado D2, antes del maquinado. (J.C. Tan, etal. 1999).	61
Figura 2. 22 Características de los revestimientos HVOF comparados con aquellos producidos usando el proceso de rociado estándar de plasma. (P.K. Ghostho 1992).	62
Figura 2. 23 Defectos producidos en los recubrimientos en el proceso de proyección térmica. (a) Defectos Estructurales. (b) Desprendimiento del recubrimiento. (J. Rodríguez 2003).	65
Figura 2. 24 (a) Estructura laminar, típica de la proyección térmica. (R. Davis 2004). (b) Superficie de un recubrimiento de Fe-Cr-Mo, aplicado por proyección térmica por combustión (x350). (J.R. Davis 2004).	66
Figura 2. 25 Representación esquemática de las irregularidades de una superficie (Z. Gahr, etal. 1987).	70
Figura 2. 26 Perfilometría de Recubrimientos aplicados por proyección térmica. (a) Fe-Cr-Mo. (J. Saaedi T. etal. 2009)	71

Figura 2. 27 Representación esquemática de la medición de la rugosidad promedio Ra de una superficie. (R. S. Lima, etal. 2001).....	72
Figura 2. 28 Representación esquemática de la rugosidad Rq o Rrms de una superficie (R. S. Lima, etal. 2001).	72
Figura 2. 29 Representación esquemática del ensayo de dureza Vickers (ASM Internacional 1992)	74
Figura 3. 1 Desarrollo experimental.....	78
Figura 3. 2 Maquina de tensión marca TINIUS-OLSEN	84
Figura 4. 1 Carburos primarios dispersos en una matriz de martensita revenida. atacada con Picral + HCl 3% 500X	89
Figura 4. 2 Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de Martensita revenida. 200X. ataque químico con Picral.....	90
Figura 4. 3 Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de Martensita revenida. 200X. ataque químico con Picral	90
Figura 4. 4 Granos columnares de solidificación, con precipitación interdendrítica de carburos primarios. 200X. ataque químico con Picral	91
Figura 4. 5 . Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de Martensita revenida. 200X. ataque químico con Picral	92
Figura 4. 6 Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de Martensita revenida. 100X. ataque químico con Picral	92
Figura 4. 7 Granos columnares de solidificación, con precipitación interdendrítica de carburos primarios. 200X. ataque químico con Picral	93
Figura 4. 8 Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de Martensita revenida. 500X. ataque químico con Picral	94
Figura 4. 9 Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de Martensita revenida. 100X. ataque químico con Picral	94
Figura 4. 10 Granos columnares de solidificación. 200X. ataque químico con Picral.....	95
Figura 4. 11 Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de Martensita revenida. 200X. ataque químico con Picral	96
Figura 4. 12 Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de Martensita revenida. 100X. ataque químico con Picral	96
Figura 4. 13 Granos columnares de solidificación. 200X. ataque químico con Picral.....	97
Figura 4. 14 Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de Martensita revenida. 500X. ataque químico con Picral	98
Figura 4. 15 Carburos primarios $M_{23}C_6$ en matriz de Martensita revenida. 200X. ataque químico con Picral	98
Figura 4. 16 Granos columnares de solidificación. 200X. ataque químico con Picral.....	99
Figura 4. 17 Granos equiaxiales y carburos primarios $M_{23}C_6$. 200X. ataque químico con Picral	100
Figura 4. 18 Granos equiaxiales y carburos primarios $M_{23}C_6$. 200X. ataque químico con Picral	100
Figura 4. 19 Granos columnares de solidificación. 100X. ataque químico con Beraha's ...	101
Figura 4. 20 Aspecto superficial de la muestra antes de ser recubierta mediante la técnica de HVOF	109
Figura 4. 21 Vista cercana a superficie de frente de avance de cavidad, donde se nota claramente la disolución de material en forma de pequeñas picaduras (flechas amarillas), 800X (MEB).....	110
Figura 4. 22 Aspecto superficial del recubrimiento. 50X	111
Figura 4. 23 Microscopia electrónica de barrido (MEB), porosidad del depósito.	112
Figura 4. 24, Distribución de dureza Hv500 en el revestimiento del sustrato de acero grado herramienta para trabajado en frío	113
Figura 4. 25 Aspecto superficial del recubrimiento. 50X	114
Figura 4. 26 Microscopia electrónica de barrido, porosidad del deposito	114
Figura 4. 27 Ensayo de adherencia de la muestra 1 (200mm de distancia con una relación combustible oxígeno de 0,30).....	116
Figura 4. 28 Ensayo de adherencia de la muestra 2 (225mm de distancia con una relación combustible oxígeno de 0,30).....	117

Figura 4. 29 Ensayo de adherencia de la muestra 3 (250mm de distancia con una relación combustible oxígeno de 0,30).....	118
Figura 4. 30 Ensayo de adherencia de la muestra 4 (200mm de distancia con una relación combustible oxígeno de 0,40).....	119
Figura 4. 31 Ensayo de adherencia de la muestra 5 (225mm de distancia con una relación combustible oxígeno de 0,40).....	120
Figura 4. 32 Ensayo de adherencia de la muestra 6 (250mm de distancia con una relación combustible oxígeno de 0,40).....	121
Figura 4. 33 Ensayo de adherencia de la muestra 7 (200mm de distancia con una relación combustible oxígeno de 0,50).....	122
Figura 4. 34 Ensayo de adherencia de la muestra 8 (225mm de distancia con una relación combustible oxígeno de 0,50).....	123
Figura 4. 35 Ensayo de adherencia de la muestra 9 (250mm de distancia con una relación combustible oxígeno de 0,50).....	124
Figura 4. 36 Grafica de residuos que afectan al Espesor.....	125
Figura 4. 37 Grafica de residuos que afectan la Dureza	126

Listado de Tablas

Tabla 2. 1 Clasificación de aceros para herramientas según AISI/SAE (ASM 1993).	24
Tabla 2. 2 Recomendaciones de composición química del metal de aporte para la soldadura, en zonas de trabajo de diferentes aceros para herramienta en estado endurecido para soldar con GTAW y SMAW. (D. Cedré, etal. 2003).	41
Tabla 2. 3 Precalentamiento para la soldadura de aceros grado herramienta. (Asociación española de Soldadura y Tecnologías de Unión 2001).	42
Tabla 2. 4 Principales aplicaciones de HVOF a nivel industrial (T. S. Sidhu, S. Prakash 2005).	61
Tabla 4. 1 Composición química del material base	87
Tabla 4. 2 Composición química de los materiales de aporte utilizados en la reparación por el método de GTAW.	88
Tabla 4. 3 Especificación del polvo utilizado para la aplicación mediante Proyección térmica de alta velocidad.	88
Tabla 4. 4 Dureza del metal base y su equivalencia de acuerdo a la especificación para un acero grado herramienta para trabajado en frío.	89
Tabla 4. 5 Ensayos de dureza realizados a las muestras recubiertas bajo la técnica de GTAW	102
Tabla 4. 6 Espesor del depósito en el sustrato.....	111
Tabla 4. 7 Espesor de recubrimiento depositado en sustrato	114
Tabla 4. 8 Resultados del ensayo de adherencia realizado sobre las 9 muestras recubiertas bajo la técnica de HVOF.	115
Tabla 4. 9 ANOVA de dos factores: Espesor vs. Relación Combustible/Oxígeno; Distancia	125
Tabla 4. 10 ANOVA de dos factores: Dureza vs. Relación Combustible/Oxígeno; Distancia	126